

И.Н. БАРИНОВ, В.С. ВОЛКОВ

**ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ.
ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ**

Учебное пособие

Пенза 2013

Содержание

Введение

1 Общие вопросы измерения давления. Давление как физическая величина

2 Принципы построения полупроводниковых тензочувствительных элементов датчиков давлений

2.1 Общие сведения о кремнии. Индексы Миллера

2.2 Тензоэффект и его математическое описание

2.2.1 Тензорезистивные коэффициенты

2.2.2 Температурные и концентрационные зависимости сопротивления тензорезистивных слоев

2.3 Мост Уитстона

2.4 Топология полупроводниковых тензочувствительных элементов датчиков давлений

2.4.1 Тензорезисторы p -типа проводимости на плоскости (100)

2.4.2 Тензорезисторы n -типа проводимости на плоскости (100)

2.4.3 Выбор и расчет конструкций полупроводниковых тензорезисторов

2.5 Температурная зависимость характеристик полупроводниковых тензочувствительных элементов. Температурная компенсация измерительного моста

2.5.1 Температурная компенсация при питании током

2.5.2 Температурная компенсация при питании напряжением

Введение

Давление является одной из основных величин, связанных с описанием жидких и газообразных сред. Большое разнообразие систем, в том числе и датчиковой аппаратуры, для измерения давлений объясняется тем, что понятие давление охватывает протяженную область значений – от сверхвысокого вакуума до сверхвысоких избыточных давлений [1]. По данным различных источников, одним из самых многочисленных классов датчиков, используемых в авиационной, ракетно-космической технике, на атомных станциях, в общепромышленной аппаратуре и т.д., являются датчики давлений, в том числе и полупроводниковые, занимающие лидирующие позиции на мировом рынке датчиков [2, 9, 10, 11]. Полупроводниковые технологии применяются для создания датчиков давлений, перемещения, частоты вращения, линейных и угловых ускорений, температуры и др. При этом используются различные принципы преобразования: тензорезистивный, емкостной, резонансный, индукционный, ионизационный и др. [3]. Однако одним из самых распространенных типов чувствительных элементов для датчиков давлений являются чувствительные элементы на полупроводниковых технологиях, построенные на основе тензорезистивного эффекта. Это объясняется тем, что в большинстве случаев требуется одновременно обеспечить выполнение требований по нескольким параметрам датчиков – точности, стабильности выходных характеристик, надежности, долговечности, низкой цене. Наиболее полно таким требованиям, по сравнению с чувствительными элементами на других принципах преобразования, удовлетворяют полупроводниковые тензорезистивные датчики давлений.

Кроме того, полупроводниковые тензорезисторы, ведя себя подобно широко известным проволочным или фольговым тензорезисторам, превосходят их, однако, по своей тензочувствительности (коэффициенту K). Коэффициент K у полупроводниковых тензорезисторов почти на два порядка выше, поэтому в случае продольных деформаций в 0,1% сопротивление меняется примерно на 10%. Следовательно, при основном сопротивлении тензорезистора порядка 100 Ом достигаются абсолютные изменения сопротивления от нескольких до десятков Ом. Столь большие изменения сопротивлений практически устраняют многие трудности, с которыми связано использование проволочных тензорезисторов, например искажения, вызываемые термо-э.д.с. или изменением переходных сопротивлений контактов в подводящих проводах [4].

В современных тензорезистивных полупроводниковых датчиках давлений измеряемая величина – давление газообразных, жидких или сыпучих сред преобразуется в электрический сигнал полупроводниковым тензочувствительным элементом (ПТЧЭ), принцип действия которого основан на функциональной зависимости между измеряемым давлением и упругими деформациями чувствительного элемента, преобразующимися в электрический сигнал полупроводниковыми тензорезисторами. Кроме того, все существующие в настоящее время полупроводниковые тензорезистивные датчики давлений имеют одно принципиальное общее решение – ПТЧЭ с расположенными на нем тензорезисторами воспринимает из-

меряемое давление непосредственно, без промежуточного преобразования его в силу. Такие принципы построения сочетают простоту с высокой надежностью, что позволяет разрабатывать датчики давления экономичные и надежные, способные работать в сложных эксплуатационных условиях с минимальной погрешностью. Поэтому в настоящее время существует большое разнообразие конструктивно-технологических решений ПТЧЭ для использования их в датчиках давлений различного назначения.

В данной работе рассматриваются конструктивно-технологические решения полупроводниковых тензочувствительных элементов датчиков давлений, в частности общие вопросы измерения давления, принципы построения ПТЧЭ датчиков давлений, а также технологические методы создания таких ПТЧЭ.

1 Общие вопросы измерения давления. Давление как физическая величина

Кинетическая теория газов утверждает, что давление является мерой полной кинетической энергии молекул [76]:

$$p = \frac{2}{3} \frac{KE}{V} = \frac{1}{3} \rho C^2 = NRT,$$

где KE – кинетическая энергия; V – объем; C^2 – среднее значение квадрата скоростей молекул; ρ – плотность; N – число молекул в единице объема; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Здесь предполагается, что давление и плотность газов связаны линейной зависимостью, то есть увеличение давления приводит к пропорциональному росту плотности. Например, при температуре 0°C и давлении 1 атм. плотность воздуха составляет $1,3 \text{ кг/м}^3$, в то время как при той же температуре, но давлении 50 атм. – его плотность уже будет 65 кг/м^3 , то есть в 50 раз больше. В отличие от газов плотность жидкостей мало меняется в широком диапазоне давлений и температур. Например, для воды при температуре 0°C и давлении 1 атм. плотность составляет 1000 кг/м^3 , в то время как при той же температуре и давлении 50 атм. – плотность равна 1002 кг/м^3 , а при температуре 100°C и давлении 1 атм. – плотность равна 958 кг/м^3 .

Оценивать значение давления можно как в абсолютных, по отношению к вакууму, так и в относительных, по отношению к атмосферному давлению, единицах; кроме того, результат измерения может быть разностью двух произвольных величин – двух разных давлений. Наконец, измерение давления может проводиться в различных средах, физические и химические характеристики которых весьма разнообразны.

Давление – это физическая величина, характеризующая воздействие усилия на единицу площади поверхности тела или условно выделенную внутри тела элементарную площадку [1].

Величина давления p жидкости или газа на стенку сосуда, который они полностью заполняют, определяется силой dF , действующей по нормали к элементу поверхности ds стенки сосуда:

$$p = dF / ds.$$

На жидкость действует также сила тяжести. Поэтому, например, в случае столба жидкости, находящейся в открытой вертикальной емкости, давление в точке на расстоянии h от поверхности равно сумме атмосферного давления p_0 и массы столба жидкости, действующей на единицу площади:

$$p = p_0 + \rho gh,$$

где ρ – плотность жидкости; g – ускорение силы тяжести.

Если на жидкость действует еще какое-либо ускорение, необходимо учитывать также влияние силы инерции на величину давления.

Атмосферное давление p_0 , называемое барометрическим или гравитационным, является следствием земного притяжения, удерживающего частицы воздуха

у поверхности Земли. На практике измерения осуществляются чаще всего относительно исходного атмосферного давления. Разность давлений внутри сосуда и атмосферного давления снаружи сосуда называется *избыточным давлением*, причем избыточное давление может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Сумма барометрического и избыточного давлений называется *абсолютным давлением*.

Барометрическое давление в разных слоях атмосферы зависит от высоты их расположения над уровнем моря и изменяется по экспоненциальному закону:

$$p_H \approx p_0[\exp(-\rho_0/p_0)H],$$

где p_0 и p_H – давления на уровне моря и на высоте H соответственно; ρ – плотность воздуха на уровне моря.

Измерение давления в неподвижных жидкости или газе в замкнутых сосудах, полостях и трубопроводах сводится к измерению силы F , действующей на поверхность S стенки, ограничивающей среду – объект измерения. В движущихся жидкости или газе различают три вида давления: статическое давление неподвижной среды p_s , динамическое давление p_d , обусловленное скоростью v движущихся жидкости или газа, и полное давление p , представляющее сумму этих двух давлений:

$$p = p_s + p_d$$

Динамическое давление, действующее на поверхность, нормальную направлению течения, увеличивает статическое давление на величину:

$$p_d = \rho v^2/2,$$

где v – скорость движения жидкости или газа; ρ – плотность среды.

Отдельной областью является измерение акустических давлений – знакопеременных давлений в жидкостях и газах в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот. Датчики акустических давлений должны реагировать только на переменную составляющую измеряемого давления, то есть на выходной сигнал не должно влиять атмосферное давление.

Единицей измерения давления и напряжения в системе СИ является Паскаль – давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной на поверхности 1 м² и нормальной к ней. Однако продолжают использоваться внесистемные единицы измерения давления, применение которых обусловлено практическими нуждами.

Иногда в качестве технической единицы измерения давления применяется единица, называемая атмосфера, обозначаемая 1 атм. Одна атмосфера это давление, которое оказывает столб воды высотой 1 метр на площадку 1 квадратный сантиметр при температуре +4°C и нормальном гравитационном ускорении. Для грубых оценок можно запомнить соотношение: 0,1 мм Н₂О создает давление, приблизительно равное 1 Па. В промышленности применяется другая единица давления, называемая торр (это название дано в честь физика Торричелли), которая определяется как давление, создаваемое столбиком ртути высотой 1 мм при 0°C, нормальном атмосферном давлении и нормальной гравитации. Идеальное давление атмосферы Земли, равное 760 торр, называется технической атмосфе-

рой. В системе единиц США давление измеряется в фунтах-силы на квадратный дюйм. Эта единица там обозначается как psi.

В таблице 1.1 (см. приложение) приведен перевод наиболее распространенных единиц измерения давления.

В акустических измерениях уровень звукового давления газовой среды (дБ) обычно оценивается в относительных единицах согласно формуле:

$$N = 20 \lg(p/p_0),$$

где p – эффективное значение акустического давления, Па; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – давление, соответствующее величине интенсивности звукового порога.

Перевод единиц из одной системы в другую в соответствии с приведенной выше формулой дан в таблице 1.2.

Таблица 1.2

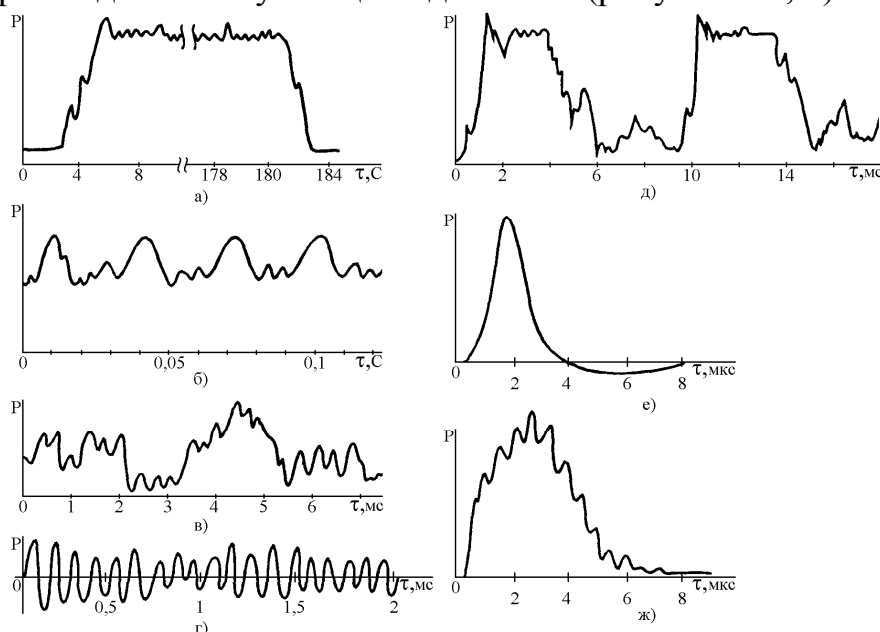
дБ	мкбар	кг·с/см²	Па
80	2	$2 \cdot 10^{-6}$	0,2
86	4	$4 \cdot 10^{-6}$	0,4
92	8	$8 \cdot 10^{-6}$	0,8
98	15	$1,6 \cdot 10^{-5}$	1,6
100	20	$2 \cdot 10^{-5}$	2,0
110	64	$6,4 \cdot 10^{-5}$	6,4
120	200	$2 \cdot 10^{-4}$	20
130	632,4	$6,3 \cdot 10^{-4}$	63,2
140	2000	$2 \cdot 10^{-3}$	200
150	6324	$6,3 \cdot 10^{-3}$	632,4
160	20000	$2 \cdot 10^{-2}$	2000
170	63240	$6,3 \cdot 10^{-2}$	6324
180	$2 \cdot 10^5$	0,2	$2 \cdot 10^4$
190	$6,324 \cdot 10^5$	0,632	$6,324 \cdot 10^4$
200	$2 \cdot 10^6$	2,0	$2 \cdot 10^5$

В зависимости от скорости изменения давления, то есть характера зависимости $p(\tau)$ все разнообразие задач измерения давлений можно свести к трем вариантам: измерение статических и медленноменяющихся давлений, измерение быстроменяющихся давлений и измерение импульсных давлений.

В промышленности принято к группе статических относить давления, значения которых остаются неизменными за время эксперимента или за время проведения измерений. Медленноменяющееся давление – это процесс, содержащий постоянную составляющую и гармонические составляющие с частотами до 20...30 Гц. К быстроменяющимся и импульсным давлениям относят процессы со случайным и гармоническим составляющими в частотном диапазоне от десятков до сотен тысяч раз.

Характер изменения медленноменяющихся давлений во времени различен: $p(\tau)$ может представлять собой сложную функцию, постоянная составляющая ко-

торой аппроксимируется, например, трапецеидальным импульсом с различными временами нарастания и спада при наличии вытянутого участка установившегося давления, сопровождаемого пульсацией давлений (рисунок 1.1, *а*).



а – медленноменяющееся давление; *б* – медленноменяющееся давление, сопровождаемое пульсацией; *в* – быстроменяющееся давление с постоянной составляющей; *г* – быстроменяющееся давление без постоянной составляющей; *д* – импульсное давление; *е, ж* – ударное или взрывное давление в рабочем диапазоне частот измерения давлений и дестабилизирующих факторов

Рисунок 1.1 – Характер изменения давления во времени

Быстроменяющиеся давления (см. рисунок 1.1, *б*) включают в себя периодически меняющиеся переходные процессы. Пульсация давления жидкости и газа и акустические шумы часто представляют собой случайный колебательный процесс (см. рисунок 1.1, *в, г*).

Импульсные давления имеют вид одиночных или периодически повторяющихся импульсов и характеризуются значительной амплитудой импульсов и короткими временами нарастания и спада процесса. Чаще всего эти процессы не имеют постоянной составляющей (см. рисунок 1.1, *д-ж*).

Наиболее жесткие метрологические требования предъявляются к датчикам и системам, измеряющим статические и медленноменяющиеся процессы. Это объясняется тем, что датчики должны с допускаемыми погрешностями одновременно измерять переходные процессы и установившиеся давления, сопровождаемые пульсацией. Эти требования противоречивы и во многих случаях трудно совместимы в одном датчике, так как для измерения переходных процессов с малой погрешностью необходима высокая частота собственных колебаний и малая степень успокоения, а для малой погрешности измерения установившегося давления, сопровождаемого высокой частотной пульсацией – необходима низкая частота собственных колебаний и большая степень успокоения. Датчики, предназначенные

для измерения быстроменяющихся и пульсирующих давлений, должны обладать малыми динамическими погрешностями, то есть высокой частотой собственных колебаний и отсутствием механических и электрических резонансов в рабочем диапазоне частот измерения давлений и дестабилизирующих факторов. При этом для обеспечения допускаемых динамических погрешностей системы в целом каждый элемент системы (датчик-усилитель-преобразователь-регистратор) должны быть согласованы по частотным диапазонам измерений.

Таким образом, все задачи измерения давления можно разделить на следующие основные группы: измерение абсолютного или избыточного давления и измерение разности давлений. Отдельно следует выделить задачи измерения давления газов в пределах не выше атмосферного – вакууметрию и измерение параметров звуковых волн в газовой и жидкостной среде – акустические измерения. А в зависимости от скорости изменения давления, задачи измерения давлений можно свести к трем вариантам: измерение статических и медленноменяющихся давлений, измерение быстроменяющихся давлений и измерение импульсных давлений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

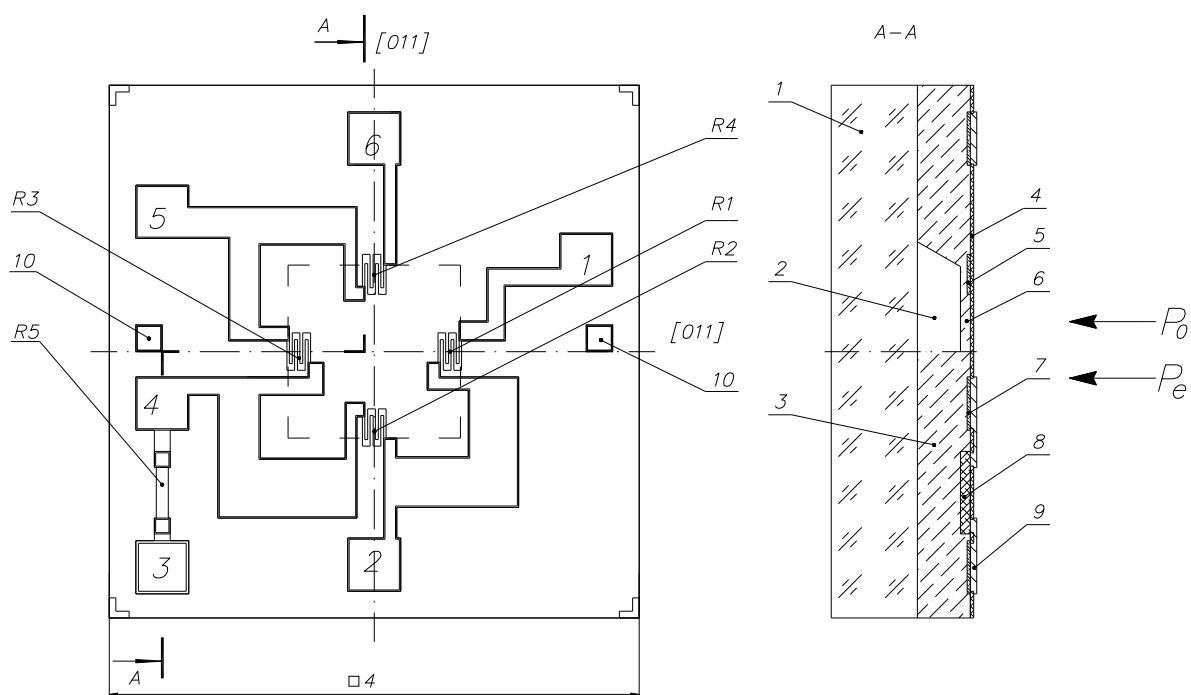
1 Какие давления называются избыточным и абсолютным?

2

2 Принципы построения полупроводниковых тензочувствительных элементов датчиков давлений

Во второй части данной работы будут представлены и проанализированы наиболее типичные ПТЧЭ с точки зрения конструкции и топологии в зависимости от типа и диапазона измеряемого давления, а также требований по техническим параметрам и характеристикам датчиков давлений, имеющих в своем составе данные ПТЧЭ.

Перед представлением основ построения ПТЧЭ датчиков давлений в целом, рассмотрим в общем виде конструкцию и принцип работы одного, отдельно взятого ПТЧЭ с целью дальнейшего детального описания компонентов и принципов построения типичных ПТЧЭ датчиков давлений. В качестве примера возьмем ПТЧЭ датчика абсолютного давления, представленного на рисунке 2.1.



1 – Стеклоное основание; 2 – вакуумируемая полость; 3 – кремниевая подложка; 4 – слой двуокиси кремния; 5 – тензорезисторы; 6 – мембрана; 7 – коммутационные шины; 8 – терморезистор; 9 – контактные площадки; 10 – знаки совмещения

Рисунок 2.1

ПТЧЭ состоит из двух частей – стеклянного основания (1) и кремниевой подложки (кристалла) (3), соединенных электростатическим методом (см. п. 3.8). Между ними сформирована вакуумированная полость (2), обеспечивающая наличие в конструкции ПТЧЭ так называемого опорного давления. Это необходимо для обеспечения измерения абсолютного давления (см. п. 1), когда избыточное давление, воздействуя на ПТЧЭ с одной стороны – в данном случае со стороны тензорезисторов (P_e на рисунке 2.1), суммируется с атмосферным давлением (P_0 на рисунке 2.1), которое также воздействует на ПТЧЭ лишь с одной, той же самой стороны, что обусловлено существованием с противоположной стороны вакуума, не оказывающего влияния на ПТЧЭ ни по причине воздействия избыточного или атмосферного давлений. Таким образом, избыточное давление, суммируясь с атмосферным, образует абсолютное. Причем не важно, с какой стороны кристалла располагается вакуумированная полость; необходимо лишь, чтобы P_0 и P_e воздействовали на него одновременно с одной стороны. Соответственно, конструкция любого ПТЧЭ для измерения избыточных давлений должна предусматривать возможность воздействия атмосферного давления на обе стороны кристалла, а измеряемого (то есть избыточного) – только на одну. Принцип работы ПТЧЭ заключается в следующем. Измеряемая величина-давление, воздействуя на мембрану (6), деформирует тензорезисторы (5), расположенные на мембране в местах наибольших поверхностных механических напряжений и увеличивает разбаланс мостовой схемы, в которую замкнуты тензорезисторы с помощью коммутацион-

ных шин (7), и, таким образом, получается выходной электрический сигнал, пропорциональный сопротивлению, изменяющемуся под воздействием давления.

Далее подробно остановимся на компонентах как представленного ПТЧЭ, указанных на рисунке 2.1, так и компонентах, не вошедших в его состав, но играющих немаловажную роль в конструкциях других ПТЧЭ для измерения разных типов давлений, их функциональном назначении и принципов построения.

2.1 Общие сведения о кремнии. Индексы Миллера

В настоящее время и в обозримом будущем кремний останется основным материалом для производства ПТЧЭ датчиков давлений. Это объясняется рядом его уникальных физических и химических свойств.

Кремний как исходный материал доступен и дешев, а технология получения, очистки, обработки и легирования и т.п. хорошо разработана, что обеспечивает высокую степень кристаллографического совершенства изготавливаемых структур. По этому показателю кремний намного превосходит сталь.

Кремний обладает хорошими механическими свойствами. По значению модуля Юнга кремний приближается к нержавеющей стали и намного превосходит кварц и различные стекла. По твердости кремний близок к кварцу и почти вдвое превосходит железо. Монокристаллы кремния имеют предел текучести, который в три раза больше, чем у нержавеющей стали. Однако при деформации он разрушается без видимых изменений размеров, тогда как металлы обычно претерпевают пластическую деформацию. Причины разрушения кремния связаны со структурными дефектами кристаллической решетки, в основном расположенными на поверхности монокристаллов кремния. Полупроводниковая промышленность успешно решает проблему высококачественной обработки поверхности кремния, так что зачастую кремниевые механические компоненты (например, упругие элементы в сенсорах давления) превосходят по прочности сталь (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Характеристики основных материалов микроэлектроники

Материал	Предел текучести, 10^9 Па	Твердость, кг/мм^2	Модуль Юнга, 10^{11} Па	Плотность, г/см^3	Коэффициент теплового расширения, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Кремний (Si)	7,0	850	1,9	2,3	2,33
Высококачественная легированная сталь	4,2	1500	2,1	7,9	12

Обычная сталь	2,1	660	2,0	7,9	17,3
Алмаз	53	7000	10,35	3,5	1,0
Карбид кремния (SiC)	21	2480	7,0	3,2	3,3
Нитрид кремния (Si ₃ N ₄)	14	3486	2,7-2,8	3,1	1,6-2,8
Алюминий (Al)	0,17	130	0,7	2,7	25

Монокристаллический кремний представляет собой твердый и хрупкий материал, упруго деформирующийся до достижения своего предела текучести – в этой точке происходит разрушение. Предел текучести кремния равен 7 ГПа, что эквивалентно массе 700 кг, подвешенной на площади 1 мм². И предел прочности на разрыв, и твердость являются показателями сопротивления материала пластической деформации. Следовательно, они приблизительно пропорциональны. Деформация материала, возникающая при повышенных температурах и статических напряжениях, называется ползучестью. Она определяется как зависящая от времени необратимая деформация материала под действием постоянной нагрузки.

Кремний не демонстрирует ни пластической деформации, ни ползучести при температурах ниже 500°C; поэтому кремниевые датчики по сути не подвержены усталостному разрушению при высоких циклических нагрузках. (Кремневые чувствительные элементы подвергались циклированию при более 100 миллионов циклов без наблюдаемых разрушений). Эта их способность выдерживать огромное число рабочих циклов объясняется тем, что в кремнии при комнатной температуре отсутствует механизм поглощения энергии или выработки тепла из-за межкусталлитного сдвига или смещения дислокаций. Однако при приложении нагрузки свыше предела текучести из-за хрупкости происходит катастрофическое разрушение монокристаллического кремния, а не пластическая деформация, как у металлов. При комнатной температуре материалы с высоким модулем упругости, например, Si, SiO₂ и Si₃N₄, часто проявляют линейно-упругие свойства при более низких нагрузках и резко переходят к хрупкому разрушению при более высоких нагрузках. Пластическая деформация в металлах имеет в своей основе генерацию вызванных напряжением дислокаций на границах зерен и последующую миграцию этих дислокаций, которая приводит к макроскопической деформации из-за межкусталлитных сдвигов в материале. В монокристаллическом кремнии границы зерен отсутствуют, и пластическая деформация может возникнуть только из-за миграции дефектов, изначально имеющих в решетке, или дефектов, появившихся у поверхности. Поскольку в монокристаллическом кремнии количество

этих дефектов очень мало, этот материал можно считать совершенно упругим при нормальных температурах. Совершенная упругость подразумевает пропорциональность между напряжением и деформацией (т.е. нагрузкой и прогибом) и отсутствие необратимости или механического гистерезиса. Отсутствие неупругого поведения объясняет также крайне низкие механические потери в монокристаллическом кремнии. При повышенных температурах, а в металлах и полимерах и при обычных температурах, в диаграммах напряжений-деформаций могут возникать сложные изменения. Существенная пластичность может быть вызвана в монокристаллическом кремнии при высоких (более 800°C) температурах, когда кремний заметно размягчается, а подвижность дефектов в решетке значительно возрастает. Для исключения пластической деформации кремневых пластин важно на высокотемпературных этапах избегать пленок, обычно оксидных или нитридных, которые могут асимметрично напрягать или даже деформировать пластину.

Кремний является элементом четвертой группы периодической системы Д.И. Менделеева и имеет порядковый номер 14. Электроны в атоме распределены по состояниям следующим образом:

$$1S^2 2S^2 2P^6 3P^4.$$

Первая цифра – номер энергетического уровня, латинские буквы характеризуют квадрат момента количества движения электрона вокруг ядра:

$$M^2 = \hbar^2 l(l+1),$$

где $\hbar$ – постоянная Планка; l – орбитальное число, $l = 0, 1, 2, \dots$. Для S -состояния $l = 0$, для P -состояния $l = 1$.

Цифра в показателе латинской буквы показывает, сколько электронов имеет данное значение M^2 на указанном энергетическом уровне. Третий энергетический уровень является валентным, и валентность кремния равна 4. Более высокие энергетические уровни в обычных условиях являются пустыми. При объединении атомов кремния в кристалл образуется упорядоченная кристаллическая решетка, имеющая структуру алмаза (рисунок 2.2).

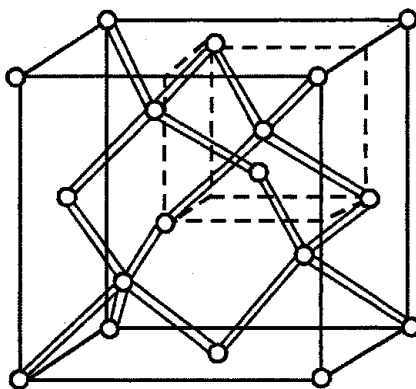


Рисунок 2.2 – Элементарная ячейка кремния

В решетке такого типа каждый атом помещен в центре правильного тетраэдра и окружен четырьмя ближайшими атомами, находящимися в его вершинах (см. рисунок 2.2, где тетраэдр выделен штриховыми линиями). Решетку алмаза можно рассматривать как наложение двух гранецентрированных решеток, сдвинутых

друг относительно друга на $\frac{1}{4}$ пространственной диагонали. Из рассмотрения расположения выделенного атома кремния и его ближайших соседей неясно, какой симметрией в целом обладает кристаллическая решетка. Принято выделять кубическую ячейку с размером стороны $a=0,357$ нм, которая принимается за элементарную ячейку кремния. Таким образом, число атомов кремния в кубическом сантиметре составляет значение примерно $5 \cdot 10^{22}$. Из 18 атомов, показанных на рисунке 2.2, одной элементарной ячейке принадлежат только восемь, учитывая, что у атома, расположенного в вершине куба, элементарной ячейке принадлежат лишь $\frac{1}{8}$ его часть, а у атома, расположенного на грани – половина. Кристалл, построенный из элементарных ячеек, изображенных на рисунке, обладает кубической симметрией. Согласно принципу Неймана, такую же симметрию должны иметь и физические свойства кристалла, например электропроводность или упругость кремния.

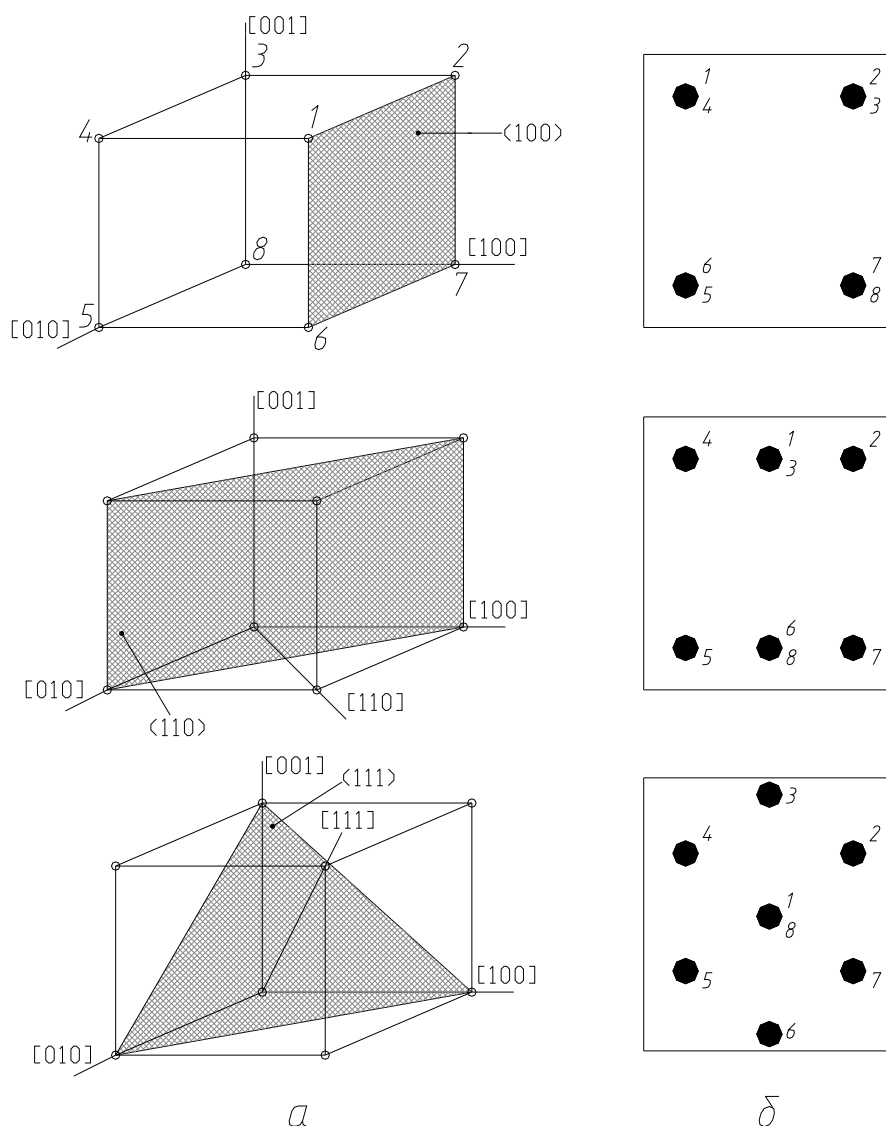
Связь атома в кристаллической решетке кремния обусловлена специфическими обменными силами, возникающими в результате попарного объединения валентных электронов у смежных атомов. Такая связь (при которой каждый из атомов остается нейтральным) называется ковалентной.

Регулярность структуры кристалла приводит к зависимости его свойств от направления в кристаллической решетке – к анизотропии. Расположение кристаллических плоскостей, в которых находятся атомы, удобно характеризовать не в абсолютных единицах – в ангстремах, микронах или сантиметрах, а в относительных. Для этой цели широко используются индексы Миллера (h, k, l). Будем измерять отрезки, отсекаемые кристаллографической плоскостью на осях системы координат x_1, x_2, x_3 , связанной со сторонами элементарной ячейки, в единицах постоянной решетки a_1, a_2, a_3 вдоль указанных осей (для обозначения осей (направлений) индексы Миллера заключают в квадратные скобки: $[hkl]$, а для соответствующих плоскостей – в круглые скобки: (hkl)). Пусть S_1, S_2, S_3 – соответствующие числа. Составим соотношения $1/S_1 : 1/S_2 : 1/S_3$ и выразим их через отношение трех наименьших целых чисел, которые и называются индексами Миллера для плоскости:

$$\frac{1}{S_1} : \frac{1}{S_2} : \frac{1}{S_3} = h : k : l.$$

На рисунке 2.3 показана ориентация важнейших кристаллических плоскостей и приведены их индексы Миллера [24, 73].

Заданные индексы определяют не одну, а целое семейство параллельных плоскостей. Совокупность физически эквивалентных плоскостей обозначается символом $\{hkl\}$, а физически эквивалентных направлений – $\langle hkl \rangle$. Примером могут служить шесть граней куба $\{100\} : [100], [\bar{1}00], [00\bar{1}], [010], [0\bar{1}0], [001]$. Цифра 0 в индексах Миллера означает параллельность плоскости какой-либо из осей. Если точка пересечения грани с одной из осей находится на отрицательном направлении последней, то соответствующий индекс обозначается чертой над индексом.



a – Происхождение индексов Миллера; *б* – расположение атомов в кристаллографических плоскостях

Рисунок 2.3

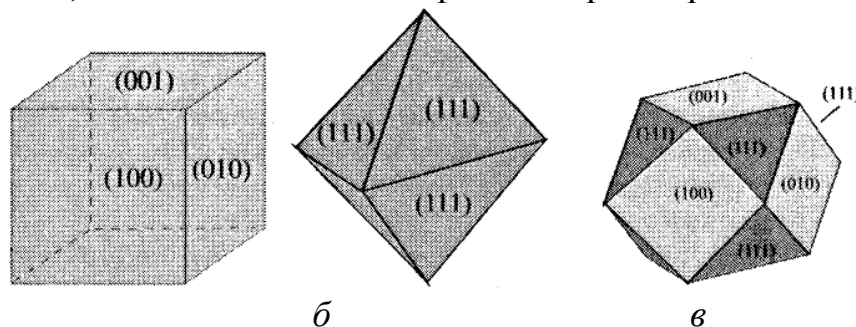
Так, индексы задней грани $(\bar{1}00)$, левой – $(0\bar{1}0)$ и нижней – $(00\bar{1})$. Происхождение индексов Миллера показано на рисунках применительно к простейшей кубической решетке. Отрезки, отсекаемые данной плоскостью на осях координат, измеряют в единицах постоянной решетки: $x=S_1h$, $y=S_2h$, $z=S_3h$, где S_1 , S_2 , S_3 – целые числа. Затем обратные величины S_1^{-1} , S_2^{-1} , S_3^{-1} приводят к общему наименьшему знаменателю и знаменатель отбрасывают; тогда числители образуют индексы Миллера для данной плоскости.

Каждой кристаллографической плоскости свойственна своя плотность атомов на единицу площади. Например, если «посмотреть» на кристалл с кубической решеткой перпендикулярно плоскостям (100) , (110) и (111) , то расположение атомов в поле зрения будет таким, как показано на рисунке 2.3, *б* (для ясности узловые атомы пронумерованы). Наибольшая плотность атомов соответствует плоскости (111) , наименьшая – плоскости (100) . Если принять за единицу плотность

упаковки атомами плоскости (100), то отношение между плотностями упаковки трех главных кристаллографических плоскостей в решетке кремния будет: $(100):(110):(111) = 1:1,4:2,3$. У кремния плоскость (111) является плоскостью спайности: по ней, как правило, распространяются трещины и происходит раскалывание кристалла.

Для разных кристаллографических плоскостей оказываются разными многие свойства и параметры кристалла: оптические свойства, скорость травления и др. Поэтому пластины для изготовления ПТЧЭ датчиков давлений шлифуют точно по заранее заданной кристаллографической плоскости, используя для контроля дифракцию рентгеновских лучей [19].

Для ПТЧЭ датчиков давлений большое практическое значение имеют пластины с ориентацией (100) и (110). Пластины ориентации (111) не могут быть обработаны с использованием анизотропного травления (за исключением анизотропного травления с использованием технологии создания дефектов лазерным излучением [30, 31]). Для большей наглядности на рисунках 2.4 и 2.5 показаны формы кристаллов, если бы они были собраны из граней различных ориентаций.



$a - \{100\}$; $б - \{111\}$; $в - \{100\}$ и $\{111\}$

Рисунок 2.4 – Преобладание в кристаллах различных граней

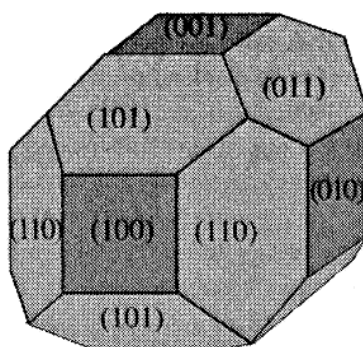


Рисунок 2.5 – грани $\{100\}$ и $\{110\}$ на кубе

В таблице 2.2 представлены аналитические выражения, характеризующие анизотропию модуля Юнга, коэффициента Пуассона и модуля сдвига для кремния в плоскостях (100), (110), (111) [10].

Таблица 2.2

Параметр	Плоскость		
	(100)	(110)	(111)

Модуль Юнга E , $1 \cdot 10^{11}$ Па	$\frac{11,36}{7,73 + \cos 4\theta}$	$\frac{15,15}{9,3 + 1,33 \cos 2\theta + \cos 4\theta}$	1,69
Модуль сдвига G , $1 \cdot 10^{11}$ Па	$\frac{2,84}{4,57 - \cos 4\theta}$	$\frac{3,79}{5,77 - \cos 4\theta}$	0,67
Коэффициент Пуассона, ν	$\frac{1,43 + \cos 4\theta}{7,73 + \cos 4\theta}$	$\frac{2,24 + \cos 4\theta}{9,3 + 1,33 \cos 2\theta + \cos 4\theta}$	0,358

Все вышесказанное относится к монокристаллическому кремнию, являющимся основным материалом при построении ПТЧЭ датчиков давлений [24, 73]. Кроме монокристаллического, некоторое использование находит поликристаллический кремний, представляющий собой предельный случай беспорядочных дислокаций (смещение плоскостей кристаллической решетки) и дефектов в монокристаллическом кремнии и состоящий из множества монокристаллических зерен (микроструктур) с разной ориентацией, тесно примыкающих друг к другу. В поликристаллах отсутствует регулярность структуры и свойственная ей анизотропия свойств. Поликристаллы могут иметь мелко- и крупнозернистую структуру. От размеров зерен зависят многие электрофизические свойства, например, электропроводность. Чем крупнее зерна, тем меньше роль границ между зернами и тем, в частности, меньше удельное сопротивление поликристалла. Однако, поскольку микроструктура поликристаллов практически неконтролируема, воспроизводимость (повторяемость) их электрофизических свойств несравненно хуже, чем у монокристаллов. С другой стороны, поскольку поликристалл сам по себе содержит множество дефектов, то он оказывается сравнительно индифферентным к появлению новых дефектов, например, при нейтронном облучении. Отсюда – повышенная радиационная стойкость поликристаллов и элементов на их основе. Но в общем, поликристаллы не стали основой при построении активных элементов большинства ПТЧЭ датчиков давлений и в основном играют вспомогательную роль, а ПТЧЭ на основе поликристаллического кремния используются, в основном, при разработке средств измерений специального назначения, когда выигрыш в приоритетных показателях, например, радиационной стойкости, компенсирует их недостатки [20].

2.2 Тензоэффект и его математическое описание

Из предыдущего краткого описания принципа работы ПТЧЭ (см. п. 2) становится понятно, что в основе построения любого ПТЧЭ лежит использование тензорезисторов в качестве компонентов, преобразующих механическое напряжение в электрический сигнал. Поэтому детальное рассмотрение составляющих любого, в том числе и упомянутого ПТЧЭ, целесообразно начать именно с тензорезистора как основного компонента всей конструкции в целом. В общем виде тензорезистор – это резистор, изменяющий свое сопротивление при деформации, вызван-

ной механическими напряжениями. Данное явление получило название тензоэффекта.

Под воздействием продольного механического напряжения тензорезистор изменяет свое поперечное сечение, длину и удельное электрическое сопротивление. Следовательно, изменение общего сопротивления обусловлено двумя факторами: изменением геометрических размеров и изменением удельного электрического сопротивления. Зависимость между этими величинами можно представить следующим образом [4]:

$$R(\varepsilon) = \frac{\rho(\varepsilon)l(\varepsilon)}{A(\varepsilon)},$$

где ε – деформация (относительное изменение длины); ρ – удельное электрическое сопротивление; l – длина; A – площадь поперечного сечения.

При $\rho(\varepsilon) = \rho_0(1 + \pi\varepsilon)$, $l(\varepsilon) = l_0(1 + \varepsilon)$ и $A(\varepsilon) = A_0(1 - \nu\varepsilon)^2$ получаем:

$$R(\varepsilon) = \frac{\rho_0 l_0 + \rho_0 l_0 \pi \varepsilon + \rho_0 l_0 \varepsilon + \rho_0 l_0 \pi \varepsilon^2}{A_0 - A_0 2\nu \varepsilon + A_0 \nu^2 \varepsilon^2},$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Для малых относительных деформаций ε , то есть пренебрегая членами с ε^2 и учитывая, что начальное электрическое сопротивление проводника равно $R_0 = l_0 \rho_0 / A_0$, получаем:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu + \pi)\varepsilon = K\varepsilon. \quad (2.1)$$

Коэффициент $(1 + 2\nu + \pi)$, называемый коэффициентом тензочувствительности, является мерой чувствительности тензорезистора и обозначается через K . Иначе формула (2.1) запишется:

$$K = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta R}{R}. \quad (2.2)$$

Так как коэффициент Пуассона ν у металлов равняется примерно 0,3, а вклад изменения удельного электрического сопротивления (определяемого значением коэффициента π) в общее изменение сопротивления тензорезистора составляет 20%, то коэффициент K для проволоочных тензорезисторов приблизительно равен 2. Аналогичный эффект был обнаружен у полупроводниковых материалов при исследовании воздействия на них механических напряжений [5]. Существенное отличие от металлов заключается, однако, в том, что значение коэффициента π велико и общее изменение сопротивления почти на 98% обусловлено изменением удельного электрического сопротивления и только на 2% связано с изменением геометрических размеров. В результате чувствительность K полупроводниковых тензорезисторов достигает значений порядка 50-150. Такая большая чувствительность является существенным преимуществом подобных тензорезисторов. Их основной недостаток заключается в зависимости сопротивления и чувствительности от температуры.

Следует подчеркнуть, что здесь рассматривается чисто объемный эффект, то есть в преобразовании принимает участие весь объем полупроводника. Тот из-

вестный факт, что изменение механического напряжения, приложенного к p - n переходу, приводит к изменению электрических характеристик этого перехода, здесь не рассматривается.

Исходным пунктом наших рассмотрений является уравнение электропроводности в общем виде с учетом анизотропии, устанавливающее связь между компонентами вектора напряженности поля E , компонентами вектора плотности тока j_k и компонентами механического тензора напряжения. Разлагая правую часть этого уравнения в ряд Тейлора в точке $j_k=0$, $T_{lm}=0$ вплоть до членов второго порядка, получаем следующее выражение:

$$E_i(j_k, T_{lm}) = E_i(0, 0) + \left[\left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \right]_{0,0} j_k + \left[\left(\frac{\partial E_i}{\partial T_{lm}} \right)_{j_k} \right]_{0,0} T_{lm} + \\ + \frac{1}{2!} \left\{ \left[\left(\frac{\partial}{\partial j_n} \left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \right)_{T_{lm}} \right]_{0,0} j_n j_k + \left[\left(\frac{\partial}{\partial T_{op}} \left(\frac{\partial E_i}{\partial T_{lm}} \right)_{j_k} \right)_{j_k} \right]_{0,0} T_{op} T_{lm} + 2 \left[\left(\frac{\partial}{\partial T_{lm}} \left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \right)_{j_k} \right]_{0,0} T_{lm} j_k \right\} + \dots,$$

где $i, k, l, m, n, o, p = 1, 2, 3$.

Частные производные имеют следующий наглядный смысл:

$$\left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \equiv \rho_{ik} \quad \text{Компонента удельного сопротивления,} \quad (2.3)$$

$$\left(\frac{\partial E_i}{\partial T_{lm}} \right)_{j_k} \equiv d_{ilm} \quad \text{Тензоэлектрические коэффициенты,} \quad (2.4)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial j_n} \left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \right]_{T_{lm}} = \left(\frac{\partial \rho_{ik}}{\partial j_n} \right)_{T_{lm}} \quad \text{Зависимость удельного сопротивления от плотности тока,} \quad (2.5)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial T_{op}} \left(\frac{\partial E_i}{\partial T_{lm}} \right)_{j_k} \right]_{j_k} = \left(\frac{\partial d_{ilm}}{\partial T_{op}} \right)_{j_k} \quad \text{Зависимость тензоэлектрических коэффициентов от механического воздействия,} \quad (2.6)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial T_{lm}} \left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \right]_{j_k} = \left(\frac{\partial \rho_{ik}}{\partial T_{lm}} \right)_{j_k} \equiv \pi_{iklm} \quad \text{Коэффициенты тензосопротивления.} \quad (2.7)$$

В кристаллах кубической симметрии из девяти компонент тензора удельного сопротивления (см. уравнение (2.3)) шесть равны нулю, а остальные три равны между собой. Это означает изотропию удельного сопротивления для такого полупроводникового материала, как кремний.

Согласно работе [6], коэффициенты уравнения (2.4) для кристаллографического класса 32 тождественно равны нулю, а тем самым равны нулю и их частные производные в уравнении (2.6). То же можно сказать о компонентах уравнения (2.5).

Помимо удельного сопротивления, остаются лишь коэффициенты π_{iklm} которые представляют особый интерес. Таким образом, уравнение электропроводности для описываемого здесь случая принимает следующий вид:

$$E_i(j_k, T_{lm}) = [\rho(j_k, T_{lm})]_{0,0} \delta_{ik} j_k + [\pi_{iklm}(j_k, T_{lm})] T_{lm} j_k + \dots$$

Поскольку величина $[\rho(j_k, T_{lm})]_{0,0}$ до механического воздействия имеет каждый раз определенное начальное значение, вводим для нее обозначение $\rho^{(0,0)}$ ($\rho^{(0,0)}$ – удельное сопротивление при $j=T=0$). Аналогично и для $[\pi_{iklm}(j_k, T_{lm})]_{0,0} = \pi_{iklm}^{(0,0)}$ и $\delta_{ik} j_k = j_i$. Тогда имеем:

$$E_i = \rho^{(0,0)} j_i + \pi_{iklm}^{(0,0)} T_{lm} j_k. \quad (2.8)$$

Развернутая запись уравнения (2.8), отнесенная к кристаллографическим осям кубической системы, с учетом некоторых вычислительных операций, подробно описанных в работе [6] (прежде всего замена индексов: 11 на 1; 22 на 2; 33 на 3; 23 на 4; 13 на 5 и 12 на 6) и приводящих к упрощению записи для значений π_{iklm} и T_{lm} , принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{E_1}{\rho^{0,0}} &= j_1 [1 + \pi_{11}^{0,0} T_1 + \pi_{12}^{0,0} (T_2 + T_3)] + \pi_{44}^{0,0} [j_2 T_6 + j_3 T_5], \\ \frac{E_2}{\rho^{0,0}} &= j_2 [1 + \pi_{11}^{0,0} T_2 + \pi_{12}^{0,0} (T_1 + T_3)] + \pi_{44}^{0,0} [j_1 T_6 + j_3 T_4], \\ \frac{E_3}{\rho^{0,0}} &= j_3 [1 + \pi_{11}^{0,0} T_3 + \pi_{12}^{0,0} (T_1 + T_2)] + \pi_{44}^{0,0} [j_1 T_5 + j_2 T_4]. \end{aligned}$$

Эти уравнения можно теперь применить к конкретным случаям, как показано ниже.

Продольный эффект.

В направлении одной кристаллографической оси действует нормальное напряжение, например T_1 , ток также течет в направлении 1 (плотность тока j_1). Тогда при $T_1 \neq 0$; $T_2 \dots T_6 = 0$; $j_1 \neq 0$; $j_2 = j_3 = 0$ получаем:

$$\frac{E_1}{\rho^{0,0}} = j_1 [1 + \pi_{11}^{0,0} T_1].$$

Поперечный эффект.

В направлении одной кристаллографической оси действует нормальное напряжение, например T_1 , ток течет в перпендикулярном к нему направлении, например 2. Тогда при $T_1 \neq 0$; $T_2 \dots T_6 = 0$; $j_2 \neq 0$; $j_1 = j_3 = 0$, так как E_i имеет то же направление, что и j , получаем:

$$\frac{E_2}{\rho^{0,0}} = j_2 [1 + \pi_{12}^{0,0} T_1].$$

Сдвиговый эффект.

Действует сдвиговое напряжение, например T_4 ; ток течет в направлении одной кристаллографической оси, например 1. Тогда при $T_4 \neq 0$; $T_1 \dots T_3$ и $T_5, T_6 = 0$; $j_1 \neq 0$; $j_2 = j_3 = 0$ получаем:

$$\frac{E_1}{\rho^{0,0}} = j_1,$$

то есть на ток в направлении 1, очевидно, не оказывает влияния сдвиговое напряжение T_4 .

Для $T_4 \neq 0$; $T_1 \dots T_3$ и $T_5, T_6 = 0$; $j_2 \neq 0$; $j_1 = j_3 = 0$, однако, имеем:

$$\frac{E_2}{\rho_{0,0}^{0,0}} = j_2 \text{ и } \frac{E_3}{\rho_{0,0}^{0,0}} = j_2 \pi_{44}^{0,0} T_4.$$

Последний член свидетельствует о том, что сдвиговые напряжения вызывают появление напряженности поля, направленной перпендикулярно направлению протекания тока; при этом не все направления равнозначны; это можно показать, проведя расчет всех возможных вариантов.

Эффект сжатия.

Действует гидростатическое давление p ; ток течет, например, в направлении 1. Тогда при $T_1 = T_2 = T_3 = -p$; и $T_4 = T_5 = T_6 = 0$; $j_1 \neq 0$; $j_2 = j_3 = 0$ имеем:

$$\frac{E_1}{\rho_{0,0}^{0,0}} = j_1 [1 - \rho(\pi_{11}^{0,0} + 2\pi_{12}^{0,0} T_1)].$$

В приведенных случаях коэффициенты тензосопротивления π_{np} называют соответственно продольными, поперечными, сдвиговыми коэффициентами и коэффициентами сжатия. Приведенные примеры показывают, как можно измерить соответствующие коэффициенты. Прикладывая определенное механическое напряжение и зная удельное сопротивление, измеряют силу тока и электрическое напряжение.

Для кубических кристаллов того класса симметрии, к которому принадлежит кремний, в системе кристаллографических осей для описания тензорезистивного эффекта достаточно знать три коэффициента π_{11} , π_{12} , π_{44} , которые иногда называют главными тензорезистивными коэффициентами [4].

Эти коэффициенты приведены в таблице 2.2 для температуры 300 К и указанных удельных сопротивлений [17, 7].

Таблица 2.2

	<i>p</i> -Si		<i>n</i> -Si	
$\rho^{0,0}/\text{Ом}\cdot\text{см}$	7,8		11,7	
Направление	<100>	<110>	<100>	<110>
$\pi_{11} \cdot 10^{-11}, \text{Па}^{-1}$	---	+6,6	---	-102,2
$\pi_{12} \cdot 10^{-11}, \text{Па}^{-1}$	---	-1,1	---	+53,4
$\pi_{44} \cdot 10^{-11}, \text{Па}^{-1}$	---	+138,1	---	-13,6
$\pi_l \cdot 10^{-11}, \text{Па}^{-1}$	0	+72	-102,2	-31
$\pi_t \cdot 10^{-11}, \text{Па}^{-1}$	0	-66	+53,4	-18

Рассмотренные выше случаи ограничиваются декартовой системой координат, ориентированной в направлении кристаллографических осей. Разумеется, применяемые ПТЧЭ можно также вырезать из монокристалла под любым углом. В этом случае также возникают тензорезистивные эффекты. Математически их расчет проводится преобразованием системы координат, причем новая система координат получается из первоначальной путем вращения и, как и та, снова является ортогональной. Таким образом, получается расчет для общего случая.

Математическое рассмотрение самого общего случая представлено в [8]. Приведем лишь некоторые выводы из такого рассмотрения, имеющие большое практическое значение:

- топологию ПТЧЭ можно спроектировать так, чтобы эффект в определенном направлении принял максимально возможное значение;
- можно изготовить ПТЧЭ, которые независимо от ориентации тензорезисторов всегда измеряли бы сумму главных напряжений;
- ПТЧЭ можно ориентировать так, чтобы они теоретически обладали исчезающе малой чувствительностью к поперечным или сдвиговым механическим воздействиям. Практически разработанные преобразователи имеют чувствительность к поперечному механическому воздействию порядка 45 дБ, что составляет 1:166 по сравнению с чувствительностью к продольному воздействию.

Именно этот последний случай имеет особое значение в измерительной технике.

Коэффициенты тензосопротивления, приведенные в таблице 2.2, зависят от ориентации, температуры и уровня легирования. Для кремния *n*-типа проводимости наибольшую роль играет π_{11} , а для кремния *p*-типа проводимости – π_{44} (как обладающие наибольшими значениями). Коэффициенты тензосопротивления связаны с коэффициентом тензочувствительности с помощью модуля Юнга.

Вклад в изменения сопротивления вносится напряжениями – продольными и поперечными, относительно текущей деформации:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sigma_l \pi_l + \sigma_t \pi_t, \quad (2.9)$$

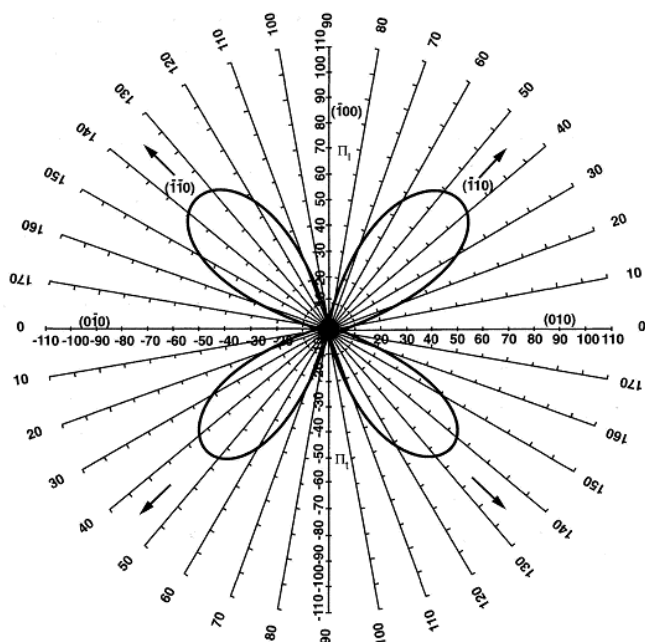
где σ_l – продольный компонент напряжения, то есть компонент напряжения, параллельный направлению текущей деформации; σ_t – поперечный компонент напряжения, то есть компонент напряжения, перпендикулярный направлению текущей деформации; π_l – продольный тензорезистивный коэффициент; π_t – поперечный тензорезистивный коэффициент.

Тензорезистивные коэффициенты π_l и π_t для кремния (100) как функция ориентации кристалла показаны на рисунке 2.6 [18].

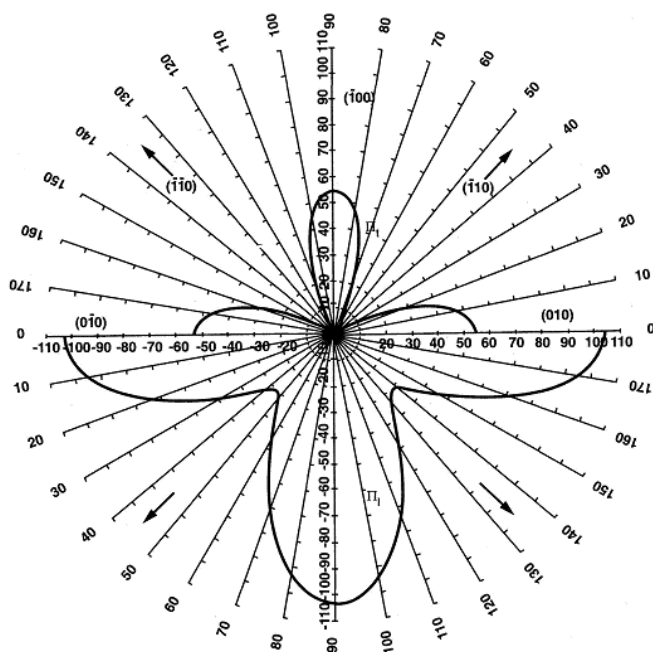
Для слабо легированного кремния *n*- или *p*- типа проводимостей ($N < 10^{18} \text{ см}^{-3}$), температурный коэффициент сопротивления (ТКС) для π_l и π_t приблизительно равен 0,25%/°С. Он уменьшается пропорционально концентрации до значения 0,1%/°С для $N \approx 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Максимизацией выражения для сопротивления, вызванного напряжениями в (2.9), можно оптимизировать достижимую чувствительность всего ПТЧЭ (см. также п. 2.5).

Ориентация мембраны ПТЧЭ датчиков давлений (см. например, рисунок 2.1) определяется анизотропией и методами изготовления (см. п. 3.7). Поверхность кремниевой пластины для изготовления ПТЧЭ датчиков давлений обычно имеет ориентацию (100), края вытравленной структуры – это пересечения плоскостей (100) и (111), и, таким образом, направления $\langle 110 \rangle$. Для ПТЧЭ датчиков давлений наиболее широко используются тензорезисторы *p*-типа проводимости. Это вызвано тем, что ориентация для максимальной тензорезистивности ($\langle 110 \rangle$) совпадает

с ориентацией стандартной вытравленной мембраны (см. например, рисунок 2.1), а также из-за того, что продольный тензорезистивный коэффициент примерно равен по своему значению, но противоположен по знаку в сравнении с поперечным тензорезистивным коэффициентом (см. таблицу 2.2 и рисунок 2.6 *a*) [21].



a



б

a – для кремния *p*-типа проводимости в плоскости (001) (10^{-12} см²/дин); *б* – для кремния *n*-типа проводимости в плоскости (001) (10^{-12} см²/дин)

Рисунок 2.6

Тензорезисторы, ориентированные под углом 45° относительно базового среза пластины, то есть в направлении $\langle 100 \rangle$, нечувствительны к прилагаемому на-

пряжению, что обеспечивает недорогой способ создавать независимые от деформации диффузионные чувствительные элементы для измерения температуры и для температурной компенсации мостовой схемы. Используя данные таблицы 2.2, можно количественно рассчитать π_l и π_t для любой ориентации.

В общем случае после преобразования координат получаются тензорезистивные коэффициенты π_l и π_t вида [23]:

$$\begin{aligned}\pi_l &= \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2); \\ \pi_t &= \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2),\end{aligned}$$

где (l_1, m_1, n_1) и (l_2, m_2, n_2) – компоненты направляющих косинусов между направлениями продольных (индекс 1) и поперечных (индекс 2) резисторов. Для направлений $\langle 110 \rangle$ в кремнии ориентации (100) эти компоненты равны:

$$(\pm 1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0):$$

$$\begin{aligned}\pi_l &= 1/2(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}); \\ \pi_t &= 1/2(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}).\end{aligned}$$

Из таблицы 2.2 можно увидеть, что для кремния p -типа проводимости π_{44} обладает бóльшим значением, чем другие два коэффициента, поэтому уравнение (2.9) можно записать как:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{44}}{2}(\sigma_l - \sigma_t). \quad (2.10)$$

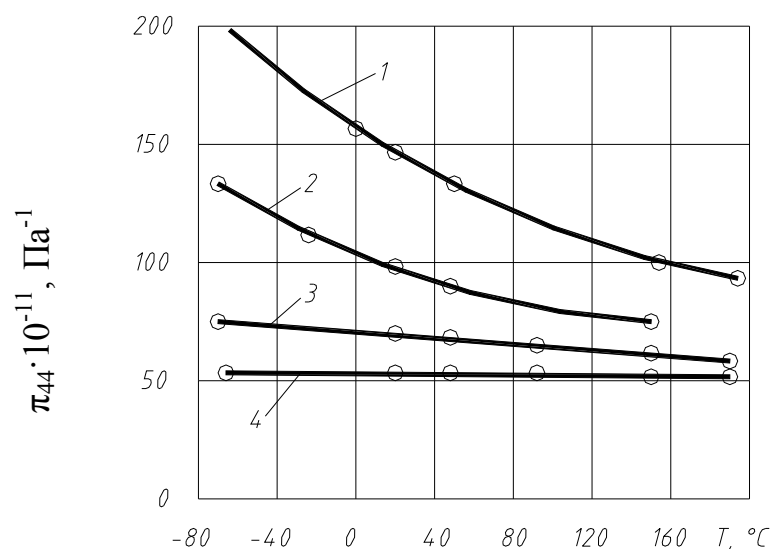
Для кремния n -типа проводимости π_{44} может быть игнорирован и мы получим:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{11} + \pi_{12}}{2}(\sigma_l + \sigma_t). \quad (2.11)$$

Уравнения (2.10) и (2.11) действительны только для однородного напряжения, или если размеры резисторов малы по сравнению с размерами мембраны.

2.2.1 Тензорезистивные коэффициенты

В ПТЧЭ датчиков давлений тензорезисторы по характеру распределения в них примесей можно условно подразделить на три класса [10]: равномерно легированные, диффузионные и ионно-имплантированные. Как уже упоминалось, коэффициенты тензосопротивления, приведенные в таблице 2.2, иначе называемые главными коэффициентами тензосопротивления, зависят от ориентации, температуры и уровня легирования. На рисунке 2.7 представлены температурно-концентрационные зависимости коэффициента π_{44} для равномерно легированного кремния p -типа проводимости [10].



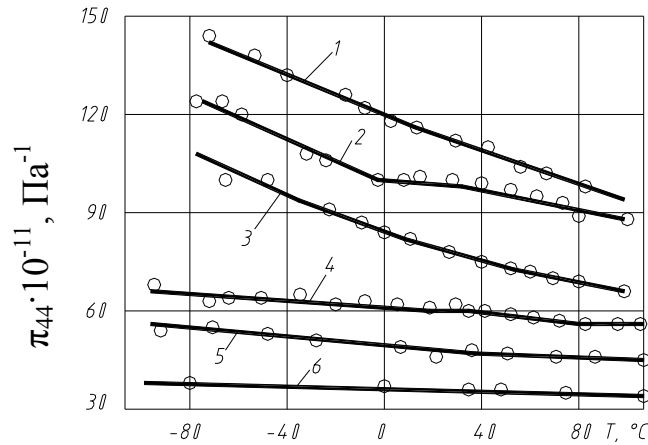
1 – $N < 10^{17}$; 2 – $N = 5 \cdot 10^{18}$; 3 – $N = 3 \cdot 10^{19}$; 4 – $N = 10^{20}$

Рисунок 2.7 – Зависимость главного тензорезистивного коэффициента π_{44} от температуры и концентрации примесей для равномерно легированного кремния p -типа проводимости

С учетом (2.10) и (2.11) для высокого уровня легирования истинные значения π_{44} будут несколько больше, чем значения π_{44} , приведенные на рисунке.

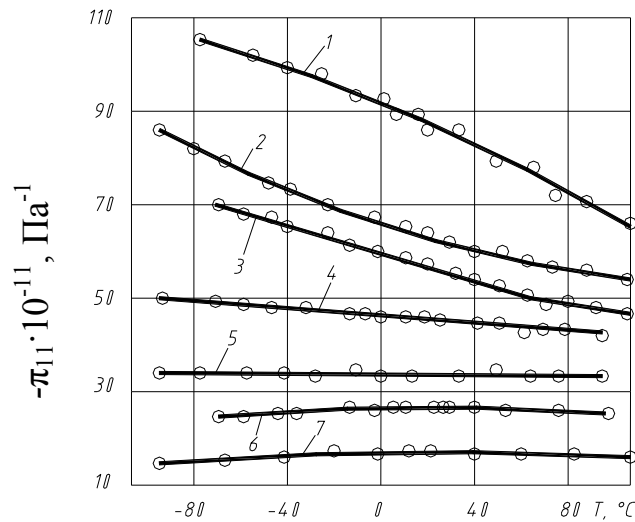
В диффузионных слоях тензорезистивные коэффициенты определяются концентрацией примесей на поверхности образца и практически не зависят от закона распределения примесей. На рисунке 2.8 приведены зависимости главных тензорезистивных коэффициентов π_{11} для n -типа проводимости и π_{44} для p -типа проводимости для кремниевых диффузионных слоев от поверхностной концентрации и температуры [25].

С учетом этих зависимостей, а также с учетом (2.10) и (2.11), можно рассчитать чувствительность диффузионных тензорезисторов и температурную зависимость чувствительности для различных значений поверхностной концентрации примесей. Так же, как и для равномерно легированных слоев, допущения (2.10) и (2.11) справедливы лишь для слабого уровня легирования. По мере увеличения концентрации примесей необходимость учета главных тензорезистивных коэффициентов (π_{11} и π_{12} для p -типа проводимости и π_{14} для n -типа проводимости) возрастает.



a

1 – $N=3 \cdot 10^{18}$; 2 – $N=9 \cdot 10^{18}$; 3 – $N=5 \cdot 10^{19}$; 4 – $N=3 \cdot 10^{20}$; 5 – $N=5 \cdot 10^{20}$; 6 – $N=2 \cdot 10^{21}$



б

1 – $N=1,8 \cdot 10^{18}$; 2 – $N=8,8 \cdot 10^{18}$; 3 – $N=5,2 \cdot 10^{19}$; 4 – $N=9 \cdot 10^{19}$; 5 – $N=2,1 \cdot 10^{20}$; 6 – $N=3,2 \cdot 10^{20}$; 6 – $N=1 \cdot 10^{21}$

a – диффузионные слои кремния *p*-типа проводимости; *б* – диффузионные слои кремния *n*-типа проводимости

Рисунок 2.8 – Зависимость от температуры и поверхностной концентрации примесей главных тензорезистивных коэффициентов

Для примера рассмотрим зависимость коэффициента π_{44} для диффузионного слоя *n*-типа проводимости от поверхностной концентрации примесей для высокой степени легирования при фиксированной температуре (рисунок 2.9) [22].

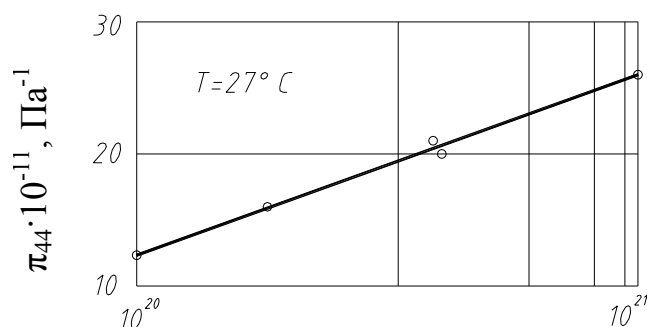


Рисунок 2.9 – Зависимость коэффициента π_{44} от поверхностной концентрации примесей для диффузионных слоев кремния *n*-типа проводимости

Как видно, по мере возрастания поверхностной концентрации примесей значение коэффициента π_{44} становится не только соизмеримым, но и больше соответствующих значений коэффициента π_{11} для тех же условий.

Концентрационная зависимость коэффициента π_{44} от температуры для кремния *p*-типа проводимости по данным [24] приведена на рисунке 2.10.

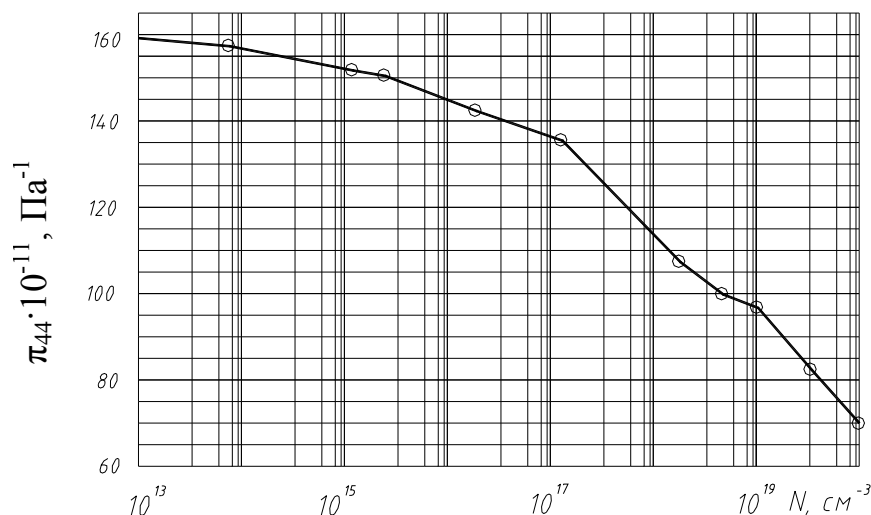


Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициента π_{44} для кремния *p*-типа проводимости от концентрации дырок при $T=300 \text{ K}$

Для ионно-имплантированных тензорезисторов в литературе отсутствуют в достаточном объеме сведения относительно зависимости главных тензорезистивных коэффициентов от концентрации, температуры и характера распределения примесей.

2.2.2 Температурные и концентрационные зависимости сопротивления тензорезистивных слоев

Аналитическое описание температурных и концентрационных зависимостей удельного сопротивления и электропроводности кремния имеет большое практи-

ческое значение при проектировании элементов микросистемной техники. Экспериментально электропроводность кремния была исследована в ряде работ, например [32, 33], в результате чего удалось с достаточной точностью описать концентрационную зависимость электропроводности при $T = 300^\circ\text{C}$.

Гораздо хуже исследован вопрос об аналитическом описании температурной зависимости электропроводности для различных концентраций примеси. В этом направлении имеется ряд работ [34, 35], из которых необходимо отметить [35], где обоснована возможность представления температурной зависимости подвижности в виде:

$$\mu = A(T) - B(T) \ln N,$$

где $A(T)$ и $B(T)$ – некоторые температурные функции.

Во всех работах расчет температурной зависимости подвижности производится с помощью классической теории, учитывающей рассеяние электронов и дырок на колебаниях кристаллической решетки и ионизированных атомах примеси. Однако данные, полученные теоретически, лишь качественно совпадают с экспериментальными данными, особенно в области концентраций $N > 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, представляющей особый интерес для тензорезистивных сенсоров.

С другой стороны, теоретические расчеты концентрации свободных носителей затруднены из-за изменения энергии ионизации примеси в зависимости от уровня легирования и некоторой перестройки энергетического спектра вблизи края валентной зоны или зоны проводимости.

Перечисленные причины привели к тому, что на практике широко применяются полуэмпирические зависимости, основанные на экспериментальных результатах. В данной работе приводится лишь линейное по температуре описание, которого достаточно для многих практических оценок. Основываясь на экспериментальных данных, концентрационную зависимость удельного сопротивления кремния при температуре 23°C можно аппроксимировать зависимостями [29]:

кремний p-типа проводимости, легированный бором:

$$\rho = \frac{1,305 \cdot 10^{16}}{N_B} + \frac{1,133 \cdot 10^{17}}{N_B \left[1 + \left(2,58 \cdot 10^{-19} N_B \right)^{-0,737} \right]}, \quad (2.12)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·см; N_B – концентрация атомов бора, см^{-3} .

Кремний n-типа проводимости, легированный фосфором:

$$\rho = \frac{6,242 \cdot 10^{18} \cdot 10^z}{N_P}, \quad (2.13)$$

где

$$z = \frac{C_0 + C_1 y + C_2 y^2 + C_3 y^3}{1 + D_1 y + D_2 y^2 + D_3 y^3}. \quad (2.14)$$

В выражении (2.14) $y = \lg N_P - 16$; $C_0 = -3,0769$; $C_1 = 2,2108$; $C_2 = -0,62272$; $C_3 = 0,057501$; $D_1 = -0,68157$; $D_2 = 0,19833$; $D_3 = -0,018376$; N_P – концентрация атомов фосфора, см^{-3} .

Графически (2.12, 2.13) выражаются зависимостями, приведенными на рисунке 2.12 (так называемые «кривые Ирвина»).

На рисунке 2.11 приведены концентрационные зависимости температурного коэффициента кремния n - и p -типа проводимостей [36].

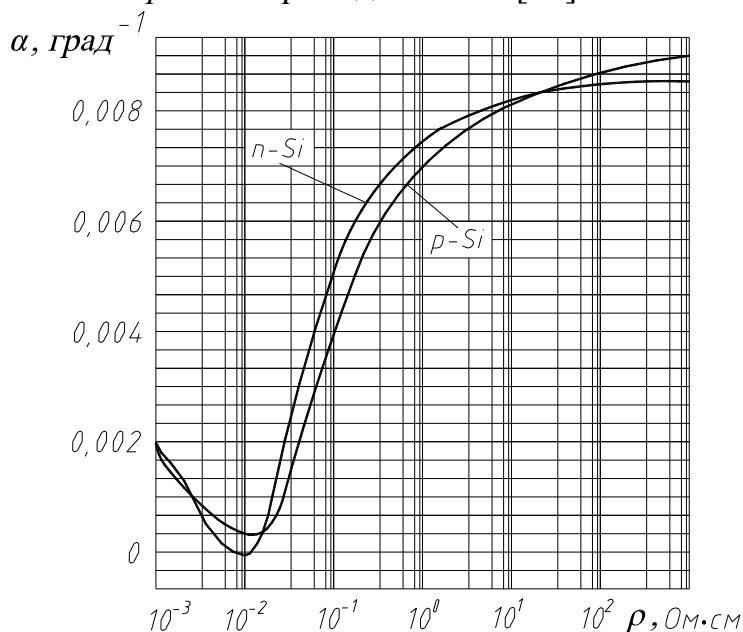


Рисунок 2.11

Здесь по оси абсцисс указано удельное сопротивление. Для перерасчета в более привычную объемную концентрацию легирующей примеси можно воспользоваться соотношениями (2.12)-(2.14). В обращенном уравнении относительно концентрации атомов бора N_B или фосфора N_P (2.12) и (2.13) принимают вид:

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{T_0},$$

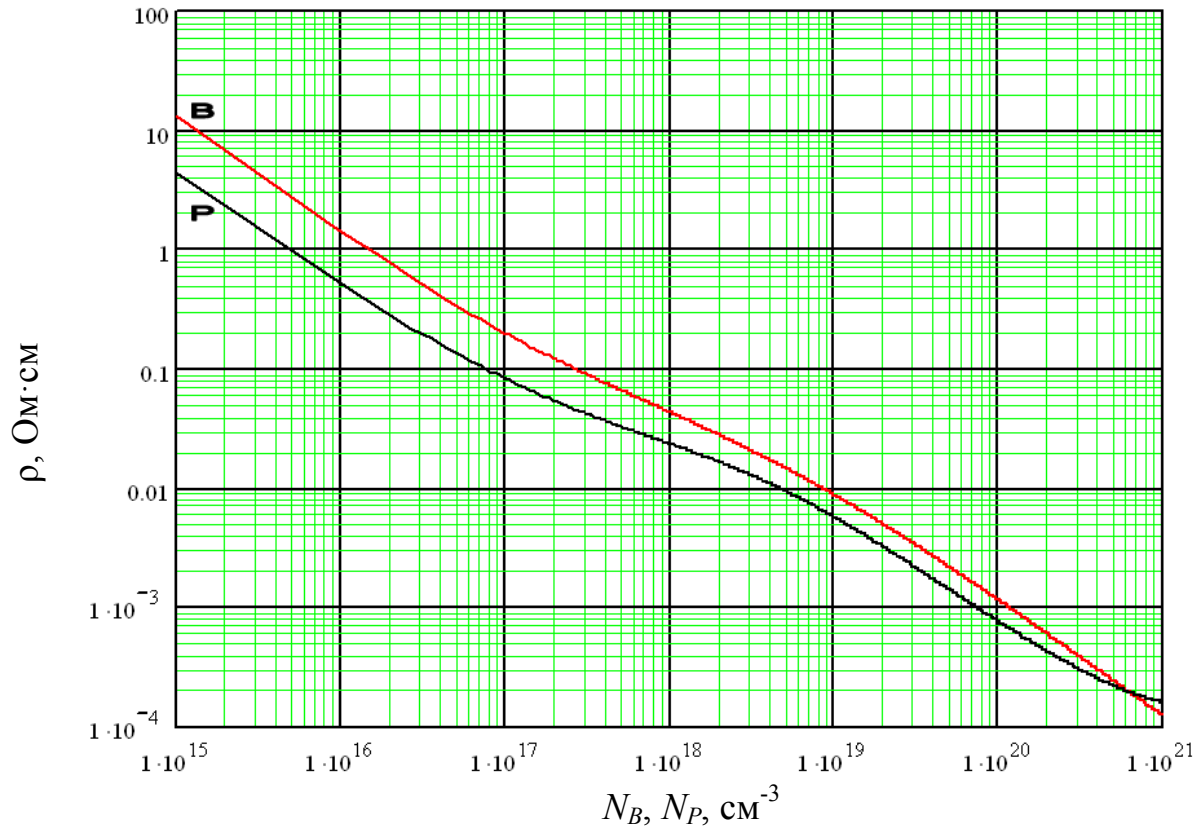


Рисунок 2.12

$$N_B = \frac{1,33 \cdot 10^{16}}{\rho} + \frac{1,082 \cdot 10^{17}}{\rho \left[1 + (54,54\rho)^{1,105} \right]};$$

$$N_P = 6,242 \cdot 10^{18+Z} / \rho,$$

где $Z = \frac{A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3}{1 + B_1 x + B_2 x^2 + B_3 x^3}$, $x = \lg \rho$; $A_0 = -3,1083$; $A_1 = -3,2626$; $A_2 = -1,2196$; $A_3 = -0,13923$; $B_1 = 1,0265$; $B_2 = 0,38755$; $B_3 = 0,041833$.

В линейном приближении с учетом (2.12)-(2.14) температурное изменение удельного сопротивления может быть описано выражением:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - 23)], \quad (2.15)$$

где T – температура, °C; $\rho(T)$ – удельное сопротивление при $T = 23^\circ\text{C}$.

Температурный интервал, в котором справедливо выражение (2.15), невелик и составляет около 20°C . Для больших интервалов становится заметен вклад членов ряда, нелинейных по температуре.

2.3 Мост Уитстона

Чтобы получить выходной электрический сигнал, пропорциональный сопротивлению, изменяющемуся под воздействием давления, через это сопротивление должен быть пропущен электрический ток или к нему должно быть подведено электрическое напряжение.

Если, например, запитывать сопротивление постоянным током, при изменении сопротивления будет изменяться падение напряжения на нем. Это изменение происходит относительно некоторой начальной постоянной величины. Поскольку механической величине соответствует только изменение электрического напряжения, его начальное постоянное значение должно быть сведено к нулю. Это достигается путем компенсации, например, с помощью так называемой мостовой схемы (рисунок 2.13).

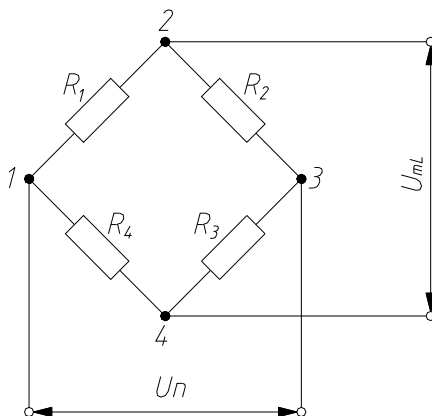


Рисунок 2.13

Подобные мостовые схемы могут быть в принципе запитаны как постоянным, так и переменным напряжением.

При изменяющемся реактансе возможно питание только переменным напряжением, при изменении омического сопротивления могут быть применены оба вида питания.

У мостов переменного напряжения для компенсации начальной постоянной величины должна быть проведена балансировка по модулю и по фазе, в результате чего возрастают затраты на подготовку измерения.

Однако сравнительно легко можно создать усилители переменного напряжения с высоким коэффициентом усиления и с достаточной стабильностью, хотя при этом возникают трудности, связанные с необходимостью синфазного выпрямления.

Мосты постоянного напряжения не требуют фазовой балансировки и последующего выпрямления, что уменьшает затраты и повышает точность. При питании постоянным напряжением, кроме того, значительно проще получить высокостабильное и обладающее малым уровнем пульсаций питающее напряжение, чем при питании несущей частотой. Эти преимущества способствуют все более широкому применению мостов постоянного напряжения, и в первую очередь при использовании полупроводниковых тензорезисторов, которые во многих случаях позволяют проводить измерения без усиления [4].

Устройство, приведенное на рисунке 2.13 и состоящее из четырех сопротивлений, принято называть мостовой схемой Уитстона. К контактам 1 и 3 моста подключается напряжение питания U_n , на контактах 2 и 4, если мост не сбаланси-

рован, то есть находится в состоянии равновесия, появляется напряжение U_{mL} . Между этими двумя напряжениями существует следующая зависимость:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (2.16)$$

При $z_1 = R_1/(R_1 + R_2)$ и $z_4 = R_4/(R_3 + R_4)$

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = z_1 - z_4.$$

Сопротивление моста можно представить себе состоящим из постоянной и переменной составляющих, то есть

$$R_v = R_{v0} + \Delta R_v = R_{v0} \left(1 + \frac{\Delta R_v}{R_{v0}} \right) = R_{v0} (1 + r_v),$$

где $\Delta R_v / R_{v0} = r_v$; v – текущий индекс.

Если все сопротивления моста равны, мост при $\Delta R_v = 0$ уравновешен, а в этом случае при рассогласовании моста имеет место соотношение:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + r_1}{1 + \frac{1}{2}r_1 + \frac{1}{2}r_2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + r_4}{1 + \frac{1}{2}r_3 + \frac{1}{2}r_4}.$$

Для малых значений r_v в первом приближении можно записать:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} \approx \frac{1}{4} [r_1 - r_2 + r_3 - r_4] = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_{10}} - \frac{\Delta R_2}{R_{20}} + \frac{\Delta R_3}{R_{30}} - \frac{\Delta R_4}{R_{40}} \right]. \quad (2.17)$$

Отсюда следует, что выходное напряжение моста U_{mL} пропорционально напряжению питания U_n и алгебраической сумме относительных изменений сопротивлений. Коэффициент пропорциональности равен $1/4$. При достаточно больших относительных изменениях сопротивлений отношение U_{mL}/U_n моста нелинейно, то есть выходное напряжение зависит не только от значений в первой степени, но и от r_v с более высокими степенями.

Преимущество мостовых устройств можно пояснить на ряде специальных примеров.

Мост с одним активным плечом $r_1 \neq 0$, $r_2 = r_3 = r_4 = 0$ (четвертьмост).

В этом случае:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 + r_1}{1 + r_1/2} - 1 \right] = \frac{1}{4} \cdot \frac{r_1}{1 + r_1/2}. \quad (2.18)$$

После разложения в степенной ряд и ограничения этого ряда квадратичным или линейным членом получим следующее выражение:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} \approx \frac{1}{4} r_1 \left[1 - \frac{1}{2} r_1 \right] \approx \frac{1}{4} r_1 = \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_{10}}. \quad (2.19)$$

При достаточно большом разбалансе у четвертьмоста наблюдается нелинейность отношения U_{mL}/U_n .

Мост с двумя активными, одинаково изменяющимися плечами (чистый полумост).

Полумост характеризуется тем, что $r_1 = -r_2$, $r_3 = r_4 = 0$. Для него действительно условие:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{1}{2} r_1 = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_{10}}. \quad (2.20)$$

Выходное напряжение такого моста при одинаковых r_v в два раза выше, чем у четвертьмоста; чистый полумост не обнаруживает нелинейности.

Мост с четырьмя активными, одинаково изменяющимися плечами (чистый полный мост).

Полный мост характеризуется тем, что $r_1 = r_3 = -r_2 = -r_4$. Для него справедливо следующее отношение:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = r_1 = \frac{\Delta R_1}{R_{10}}. \quad (2.21)$$

Выходное напряжение этого моста при равных r_v в четыре раза больше, чем у четвертьмоста, к тому же отсутствует нелинейность моста.

Связь с тензометрией получается более очевидной, если ввести простейшую (линейную) зависимость между сопротивлением тензорезистора R_v и продольной деформацией ϵ :

$$R = R_{v0} (1 + K \epsilon_v),$$

или

$$\frac{\Delta R_v}{R_{v0}} = K \epsilon_v.$$

При этом для простоты вначале предполагается, что коэффициенты K всех тензорезисторов одинаковы. Из уравнений (2.17)-(2.21) следует, что изменения каждого из сопротивлений моста должны иметь определенную направленность с тем, чтобы не было взаимной компенсации измерительного сигнала.

На рисунке 2.13 показан тензометрический мост с четырьмя активными плечами, включенными так, что все 4 тензорезистора вызывают положительное приращение выходного напряжения.

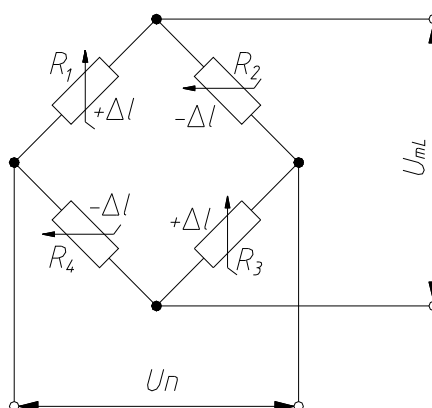


Рисунок 2.13

Как следует из вышеизложенного, для полного тензометрического моста действительно выражение:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{K}{4} [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4], \quad (2.22)$$

откуда при $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \varepsilon$ имеем:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = K\varepsilon. \quad (2.23)$$

Для чистого полумоста действительно выражение:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{K}{2} \varepsilon, \quad (2.24)$$

а для четвертьмоста выражение:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} \approx \frac{K}{4} \varepsilon. \quad (2.25)$$

В случае четвертьмоста второе приближение с учетом квадратического члена ε нельзя получить из уравнения (2.25). У полупроводниковых тензорезисторов нелинейность настолько велика, что она должна быть учтена наряду с нелинейностью моста; в совокупности нелинейность в целом уменьшается. Без учета нелинейности тензорезистора погрешность от нелинейности в случае четвертьмоста, согласно (2.25), равна $K\varepsilon/2$; для $K = 120$ и $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ она составляет 3%.

Уравнения (2.22)-(2.25) в общем виде можно представить как

$$U_{mL} = U_n B'_\varepsilon \varepsilon, \quad (2.26)$$

где B'_ε – отнесенный к величине напряжения питания моста коэффициент относительной тензочувствительности моста.

Для двух попарно изменяемых резисторов в структуре полного моста, на которые воздействует двухосное напряженное поле (σ_l, σ_t) с учетом (2.9), (2.10), (2.11) выходное напряжение:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{1}{2} (\pi_l - \pi_t) (\sigma_l - \sigma_t). \quad (2.27)$$

Наряду с мостами постоянного напряжения применяются также мосты постоянного тока, техника подключения которых несколько сложнее, и в рамках данной работы останавливаться на ней подробно представляется нецелесообразно. Тем не менее, необходимо сказать об особенностях питания постоянным током. Питание постоянным током при длинных соединительных линиях обладает тем преимуществом, что исключается влияние изменения сопротивления этих линий, (например, вследствие изменения температуры). Кроме того, питание током в случае полупроводниковых тензорезисторов нередко используется потому, что благодаря этому достигается более благоприятная температурная зависимость коэффициента относительной тензочувствительности моста (самокомпенсация моста) (см. также п. 2.5) [23].

2.4 Топология полупроводниковых тензочувствительных элементов датчиков давлений

Топология – это зафиксированное на материальном носителе пространственно-геометрическое расположение совокупности элементов и связей между ними.

Во многих работах, посвященных вопросам проектирования ПТЧЭ датчиков давлений поднимается вопрос о выборе оптимальной топологии ПТЧЭ [26, 27, 28]. Оптимизация проводится, как правило, лишь по единственному критерию – максимальной чувствительности элемента. На практике таких критериев может быть значительно больше. В ПТЧЭ, как и в любом микроэлектронном изделии, топология схемы выбирается в зависимости от физических, технологических, схематических, метрологических и конструктивных требований. При этом вариант топологии ПТЧЭ, обеспечивающий максимальную чувствительность преобразователя, может оказаться далеко не оптимальным и даже непригодным с технологической, либо конструктивной точки зрения. Поэтому в двух следующих подразделах будут подробно рассмотрены два основных топологических варианта ПТЧЭ, нашедших наиболее широкое применение при построении датчиков давлений, а перед этим остановимся на общих принципах проектирования топологии ПТЧЭ на примере круглой и квадратной мембран.

Пусть на жестко закрепленную по контуру мембрану радиусом a и толщиной h действует давление P (рисунок 2.14).

Тензорезистор расположен на расстоянии r от центра мембраны на ее обратной по отношению к приложенному избыточному давлению стороне. Радиальное σ_r и тангенциальное σ_t напряжения в этой точке можно рассчитать по формулам [71]:

$$\sigma_r = \frac{3q}{8h^2} [a^2(1+\nu) - r^2(3+\nu)];$$

$$\sigma_t = \frac{3q}{8h^2} [a^2(1+\nu) - r^2(1+3\nu)].$$

Если материал мембраны изотропен, то радиальное и тангенциальное напряжения на поверхности мембраны не зависят от угла Θ (см. рисунок 2.14). В этом случае напряжения определяются только расстоянием r от центра мембраны, как показано на рисунке 2.14. КЛинейная зависимость между приложенным давлением P и механическим напряжением справедлива лишь для малых прогибов мембраны (меньших ее толщины h), которых, как предполагается, отсутствуют напряжения в нейтральной плоскости мембраны.

Учет анизотропии механических свойств кремниевых упругих элементов теоретически может быть произведен с различной степенью приближения к эксперименту [74, 75]. Однако возрастающая при этом сложность решения иногда может оказаться неоправданной. В ряде случаев учет анизотропии приведет к такому отличию от изотропного случая, которое практически проверить весьма сложно из-за значительного технологического разброса характеристик ПТЧЭ.

В общем случае, при учете анизотропии упругих свойств кремния радиальное $\sigma_r(r, \theta)$ и тангенциальное $\sigma_t(r, \theta)$ напряжения будут являться функциями не только радиуса, но и угла на мембране. Как известно, компоненты тензора механических напряжений в системе координат, связанной с тензорезистором (см. ри-

сунок 2.14), можно выразить через радиальное и тангенциальное напряжения следующим образом [71]:

$$\sigma'_1 = \sigma_r \cos^2 \psi + \sigma_t \sin^2 \psi;$$

$$\sigma'_2 = \sigma_r \sin^2 \psi + \sigma_t \cos^2 \psi;$$

$$\sigma'_6 = (\sigma_t - \sigma_r) \sin \psi \cos \psi,$$

где ψ – угол поворота продольной оси тензорезистора относительно радиус-вектора в точку расположения тензорезистора. Как видно из рисунка 2.14, углы θ , φ и ψ связаны следующим образом:

$$\varphi = \theta + \psi;$$

таким образом, в системе координат, связанной с плоскостью упругого элемента, угол θ характеризует анизотропию упругих свойств кремния, а угол φ – анизотропию тензорезистивных свойств через анизотропию тензорезистивных коэффициентов.

В практических разработках ПТЧЭ чаще всего встречается радиально-тангенциальное расположение тензорезисторов. В этом случае для радиальных резисторов (когда $\psi=0^\circ$):

$$\varphi = \theta, \sigma'_1 = \sigma_r, \sigma'_2 = \sigma_t, \sigma'_6 = 0,$$

а для тангенциальных (когда $\psi=90^\circ$):

$$\varphi = \theta + 90^\circ, \sigma'_1 = \sigma_t, \sigma'_2 = \sigma_r, \sigma'_6 = 0.$$

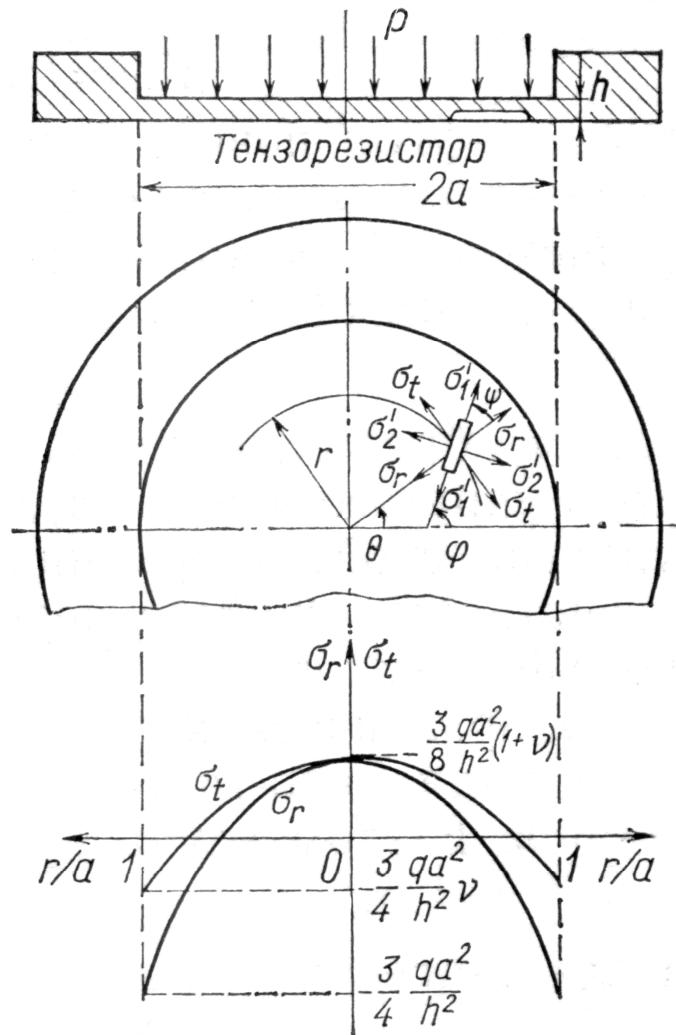


Рисунок 2.14

Для определения топологии тензорезисторов на квадратной, заземленной по контуру пластинке (мембране) размером $A \times A$ и одинаковой толщины c_{Π} , необходимо найти зависимость ее деформации от равномерно распределенного по ее площади разностного давления Δp . Заземленная по контуру квадратная мембрана в системе координат x, y, z показана на рисунке 2.15, где нанесены также местные радиусы кривизны R_1 и R_2 деформированной пластины [70, 73].

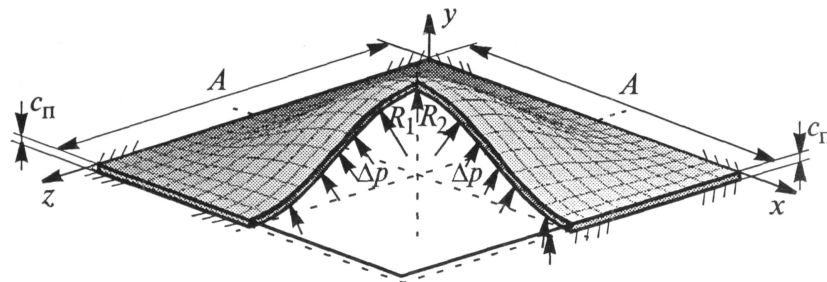


Рисунок 2.15 – Деформация квадратной мембраны, нагруженной давлением

Если частота изменения интенсивности внешней нагрузки значительно меньше частоты собственных колебаний основного (низшего) тона, уравнение, описывающее прогибы мембраны $\omega(x, z)$ в направлении оси y , имеет вид [70, 71]:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4 \partial z^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial z^4} + \frac{q}{D} \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} - \frac{1}{D} F(x, z, t), \quad (2.28)$$

где $\omega(x, z, t)$ – отклонение точки на плоскости мембраны от положения равновесия; q – масса мембраны, отнесенная к единице ее поверхности; $F(x, z, t)$ – интенсивность внешней нагрузки; $D = \frac{Ec_n^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость мембраны.

Так как мембрана имеет жесткую заделку по контуру, выполняются граничные условия:

$$\begin{aligned} \omega = 0, \frac{d\omega}{dx} = 0 \quad \text{для } x = 0 \text{ или } x = A; \\ \omega = 0, \frac{d\omega}{dz} = 0 \quad \text{для } z = 0 \text{ или } z = B. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Решение уравнения (2.28) для граничных условий (2.29) имеет вид:

$$\omega(x, z) = \frac{\Delta p A^4}{32\pi^4 D} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{A} \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{A} \right). \quad (2.30)$$

Очевидно, что максимальное перемещение соответствует центру мембраны с координатами $x = A/2, z = A/2$; тогда $\omega_{\max} = (\Delta p A^4)/8\pi^4 D$.

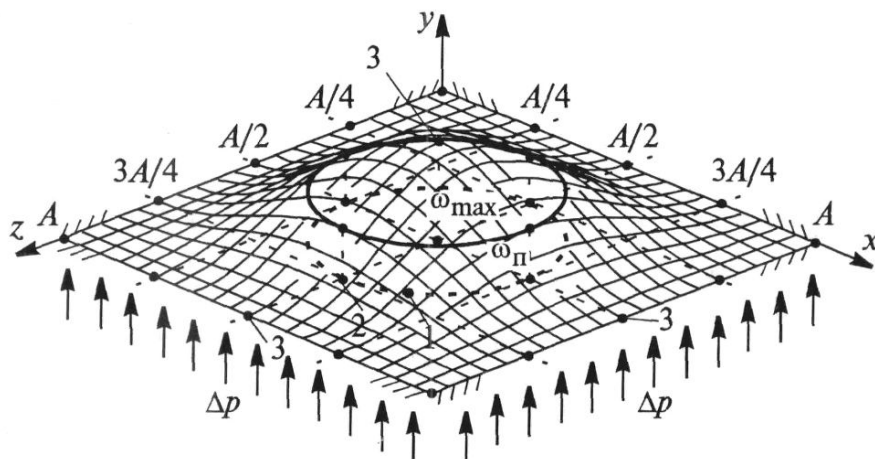
Определим жесткость мембраны в направлении оси y :

$$G_y = \frac{\Delta p S}{\omega_{\max}} = \frac{\Delta p A^2}{\omega_{\max}} = \frac{8\pi^4 D}{A^2}, S = A^2. \quad (2.31)$$

Запишем далее относительные удлинения мембраны в направлении осей x и z :

$$l_x = y/R_1, \quad l_z = y/R_2, \quad (2.32)$$

где R_1, R_2 – радиусы кривизны в плоскостях xy и zy (рисунок 2.16) [70].



1 – Геометрическое место точек с нулевой относительной деформацией; 2 – координатная точка, соответствующая нулевой относительной деформации; 3 – точки с максимальной относительной деформацией

Рисунок 2.16 – Деформация срединной плоскости защемленной по контуру мембраны

Имеют место известные соотношения [71]:

$$\begin{aligned} e_x &= -y \frac{\Delta p S}{8\pi^2 D} \cos \frac{2\pi x}{A} \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{A} \right); \\ e_z &= -y \frac{\Delta p S}{8\pi^2 D} \cos \frac{2\pi z}{A} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{A} \right). \end{aligned} \quad (2.33)$$

Выражения (2.33) позволяют определить топологию резисторов на мембране. Если, например, плоскость их расположения определяется координатой $y = -c_n/2$, то в точках с координатами $x=0, z=A/2$; $x=A, z=A/2$; $x=A/2, z=0$; $x=A/2, z=A$ имеют место максимальные деформации, определяемые формулой:

$$e_{\text{макс}} = \frac{\Delta p c_n S}{8\pi^2 D}. \quad (2.34)$$

Очевидно, в точке с координатами $x=A/2, z=A/2$ деформация также определяется формулой (2.34), но со знаком «минус». В точках с координатами: $x=A/4, z=A/2$ и $x=A/2, z=A/4$, а также $x=3A/4, z=A/2$ и $x=A/2, z=3A/4$ деформации нулевые, и в этих местах следует располагать резисторы для температурных компенсаций (терморезисторы), а в местах максимальных деформаций – тензорезисторы, включаемые в мостовые схемы. Точки с нулевой относительной деформацией соответствуют точкам перегиба линий, получаемых в результате сечений деформированной срединной плоскости мембраны плоскостями, проходящими через точку с координатами: $x=A/2, z=A/2$ и перпендикулярными плоскости xz (см. рисунок 2.16). Подставив любую из координат точек с нулевой относительной деформацией в выражение (2.30), получим перемещение точек перегиба:

$$\omega_n = \frac{\Delta p A^4}{16\pi^4 D}.$$

В работе [72] приведена формула для частоты собственных колебаний (основной тон) квадратной защемленной по контуру мембраны:

$$f_n = \frac{35,6}{A^2} \sqrt{\frac{D}{\rho c_n}}.$$

При этом собственные частоты колебаний настолько велики, что принятое допущение о возможности рассмотрения статического режима работы мембраны для решения задачи о ее деформации вполне оправдано.

Можно показать, что мембрана с жестким недеформируемым центром размером $a \times a$ имеет максимальное перемещение, равное:

$$\omega_{\text{макс}} = \Delta p \frac{(A-a)^4}{8\pi^4 D},$$

а жесткость в направлении оси y определяется формулой:

$$G_y = \frac{8\pi^4 A^2 D}{(A-a)^4}.$$

Отметим, что места максимальных напряжений мембраны располагаются по внешнему контуру ее заземления и по контуру ее границы с жестким центром.

Частота собственных колебаний мембраны с жестким центром определяется формулой:

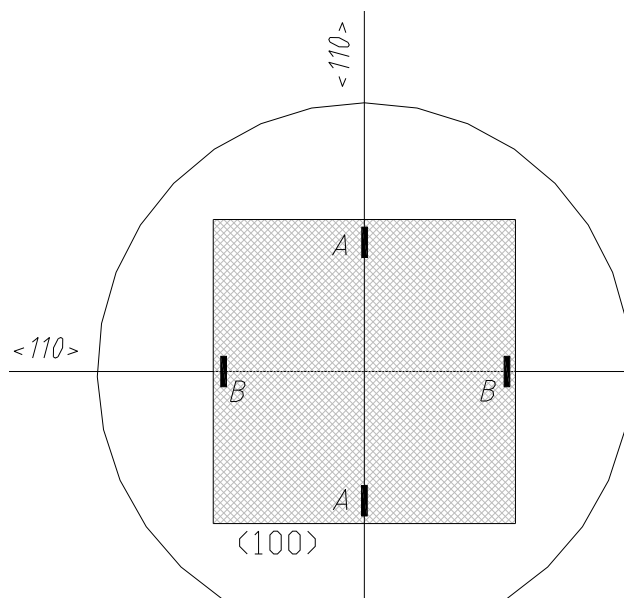
$$\omega = \sqrt{\frac{G_y}{(m_{\text{ц}} + m_{\text{п}})}},$$

где G_y – жесткость мембраны, вычисляемая по формуле (2.31); $m_{\text{ц}}$, $m_{\text{п}}$ – масса жесткого центра и упругой перемычки соответственно.

Очевидно, при установке дополнительных масс на жестком центре их значения добавляются к значению массы жесткого центра.

2.4.1 Тензорезисторы p -типа проводимости на плоскости (100)

Мост Уитстона (см. рисунок 2.13) может быть реализован для тензорезисторов p -типа проводимости их размещением в средней части по краям квадратной мембраны в местах наибольших поверхностных механических напряжений (рисунок 2.17) [21].



A – тензорезисторы, испытывающие продольную нагрузку; B – тензорезисторы, испытывающие поперечную нагрузку

Рисунок 2.17 – Реализация тензорезистивного эффекта для тензорезисторов p -типа проводимости

Два резистора ориентированы так, что они чувствительны к напряжению в направлении текущей деформации, а два других – к напряжению, перпендикулярному направлению текущей деформации. То есть два продольно напряженных тензорезистора (A) размещены напротив двух поперечно напряженных тензорезисторов (B), значение сопротивления двух из них увеличивается, а двух других – уменьшается под приложенным напряжением. В этом случае, из (2.10):

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 70 \cdot 10^{-11} (\sigma_l - \sigma_t). \quad (2.35)$$

Для практических напряжений ($\sigma_l = 10$ МПа; $\sigma_t = 50$ МПа) из (2.35) [21]:

$$\Delta R/R \sim 2,8 \, \%.$$

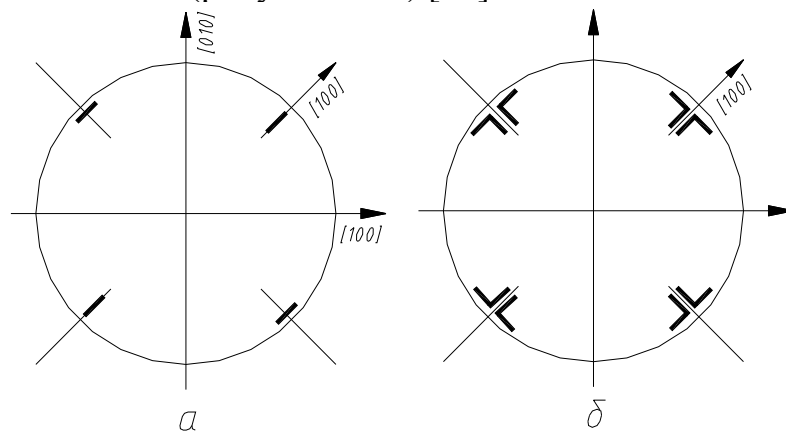
Изменяя диаметр и толщину кремниевой мембраны, возможно формирование ПТЧЭ датчиков давлений на диапазоны от 0 до 200 МПа с чувствительностью от 10 мВ/кПа для датчиков низких давлений до 0,001 мВ/кПа для датчиков высоких давлений. ПТЧЭ на рисунке 2.1 является наглядным изображением технической реализации, представленной на рисунке 2.17.

Чувствительность к давлению ПТЧЭ на рисунке 2.17 равна [10]:

$$S = 0,302\pi_{44}a^2 / h^2,$$

где a – половина стороны квадрата (заштрихованная область) (радиус в случае ПТЧЭ с круглой мембраной); h – толщина мембраны.

Данный вариант, когда тензорезисторы p -типа проводимости размещены на мембране (100), представляет собой наиболее распространенный вариант их топологического размещения, несмотря на то, что он позволяет реализовывать наименьшее из всех случаев количество топологических вариантов расположения мостовых тензорезисторных схем. Всего можно предложить два основных топологических варианта ПТЧЭ (рисунок 2.18) [10].



a – распределенная по периферии мостовая схема; b – одна или несколько сосредоточенных в определенной области мембраны полных мостовых схем

Рисунок 2.18 – Варианты топологии полных мостовых измерительных схем с тензорезисторами p -типа проводимости на мембране (100)

Все известные варианты топологии ПТЧЭ с тензорезисторами p -типа проводимости на плоскости (100) представляют собой, по-существу, эти два варианта в том числе и вариант, изображенный на рисунке 2.17, несмотря на некоторые не принципиальные отличия. Различные топологические варианты различаются:

- структурой тензорезисторов, например, вместо однополосковой структуры тензорезистора используется меандр (см. рисунок 2.1);

- взаимным расположением контактных площадок к тензорезисторам;
- способом и топологией соединений тензорезисторов в мостовую схему;
- количеством и взаимным расположением контактных площадок на кристалле.

2.4.2 Тензорезисторы n -типа проводимости на плоскости (100)

Из рисунка 2.6 видно, что поперечно напряженный тензорезистор не может быть уравновешен в отношении продольно напряженного тензорезистора. Данный недостаток устраняется соосным продольным распределением напряжений в прямоугольной мембране, представленной на рисунке 2.17 [21].

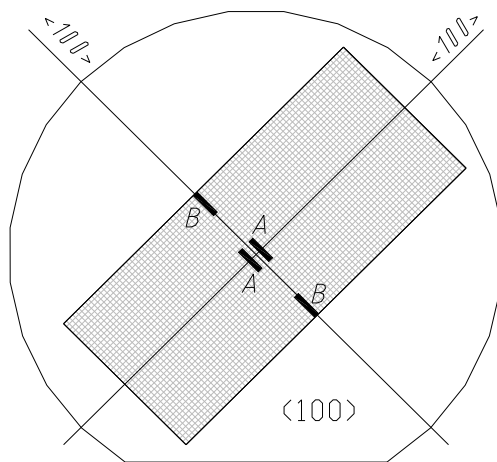


Рисунок 2.17

Для такого ПТЧЭ [21]:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 53 \cdot 10^{-11} \sigma_t - 102 \cdot 10^{-11} \sigma_l. \quad (2.36)$$

Для практических напряжений ($\sigma_l = 50$ МПа; $\sigma_t = 10$ МПа) из (2.36) [21]:

$$\Delta R/R \sim -4,6 \, \%.$$

В примере ПТЧЭ, представленном на рисунке 2.17, важно минимизировать поперечное напряжение, создавая абсолютно соосный элемент, так как продольные и поперечные компоненты напряжения имеют противоположное влияние и могут уравновесить друг друга. На практике, ПТЧЭ с предполагаемым увеличением чувствительности на 64% может быть построен по традиционной топологии в случае 80% соосности [21].

На основе тензорезисторов n -типа проводимости на плоскости (100) возможно построение нескольких топологических вариантов полных мостовых схем на поверхности мембраны. Основные из их показаны на рисунке 2.18.

Под каждым вариантом дана относительная чувствительность соответствующей мостовой схемы. Чувствительность к давлению ПТЧЭ на рисунке 2.18, принятая за единицу равна [10]:

$$S = 0,453 \pi_{11} a^2 / h^2. \quad (2.37)$$

Все варианты по чувствительности подразделяются на две категории: чувствительность имеет значение, близкое к определяемому выражением (2.37), и чувствительность примерно в два раза меньше. Уменьшение чувствительности часто можно скомпенсировать конструктивно-технологическим путем, например уменьшением толщины мембраны. Поэтому менее чувствительные топологические варианты также могут заслуживать внимания. Например, последний вариант на рисунке 2.18 представляет интерес только тангенциальным расположением тензорезисторов. Это позволяет получить несколько больший диапазон линейного преобразования, лучший отвод тепла от тензорезисторов на мембране и более рациональную топологию межсоединений тензорезисторов.

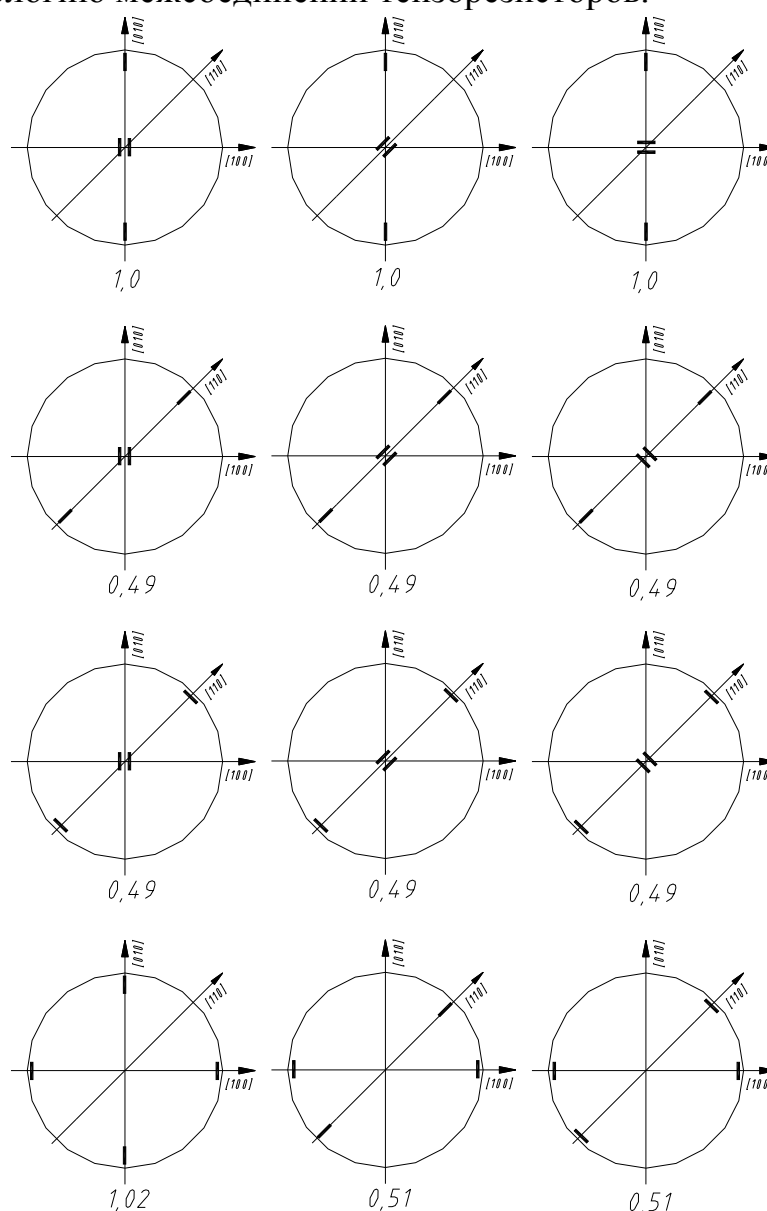


Рисунок 2.18 – Варианты топологии полных мостовых тензорезисторных схем n -типа проводимости на мембране (100)

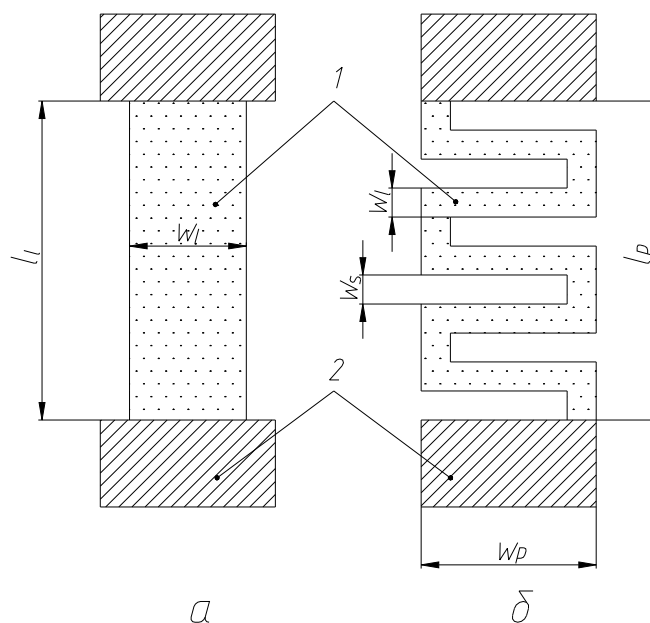
2.4.3 Выбор и расчет конструкций полупроводниковых тензорезисторов

Необходимое сопротивление тензорезисторов может определяться на стадии изготовления как технологически (см. пп. 3.5, 3.6) так и конструкционно. В последнем случае, изменяя форму тензорезистора, и учитывая известные параметры технологических методов изготовления, можно рассчитать его сопротивление с заданной точностью.

Перед рассмотрением и анализом возможных вариантов конструкций тензорезисторов, необходимо остановиться на таком понятии, как удельное поверхностное сопротивление, связывающее расчетные значения номиналов с технологическими методами изготовления тензорезисторов на различных этапах.

Физический смысл удельного поверхностного сопротивления (ρ_s) таков, что сопротивление между двумя противоположными гранями квадратного проводника остается одинаковым вне зависимости от размеров квадрата. Это происходит вследствие того, что распределение основных носителей заряда от поверхности в глубь полупроводникового материала подчиняется экспоненциальному закону, и плотность носителей (электронов или дырок) на поверхности составляет максимальное значение. Соответственно, сопротивление тем меньше, чем ближе к поверхности полупроводника и максимальная плотность тока наблюдается на расстоянии от поверхности, стремящимся к нулю. Таким образом, с точки зрения проектирования топологии тензорезистора, не важно, какова будет его высота, важны лишь два размера – длина и ширина, выраженные в количестве квадратов, которые могут быть расположены на площади тензорезистора. Соответственно, удельное поверхностное сопротивление имеет единицу измерения [Ом/л].

В общем случае любая из возможных конструкций тензорезистора имеет сходство с одной из двух, представленных на рисунке 2.19 [41, 40, 39].



1 – Участок тензорезистора; 2 – участок проводника

Рисунок 2.19 – Конфигурации тензорезисторов

Для прямолинейной конфигурации, показанной на рисунке 2.19, а, количество квадратов:

$$n = \frac{l_l}{W_l} = \frac{A_R}{W_l^2}, \quad (2.38)$$

где A_R – площадь тензорезистора, определяемая как:

$$A_R = W_l l_l. \quad (2.39)$$

Для конфигурации типа «меандр» (см. рисунок 2.19, б), количество квадратов выражается приблизительно числом прямых линий длиной W_p , умноженных на число квадратов в каждой линии, или:

$$n \approx \frac{l_p}{W_l + W_s} \frac{W_p}{W_l} = \frac{A'_R}{W_l^2 (1 + W_s / W_l)}, \quad (2.40)$$

где $A'_R = W_p l_p$ – площадь тензорезистора.

Более точный способ определения числа квадратов дан ниже.

Фактически уравнение (2.40) можно использовать в обоих случаях, так как оно переходит в уравнение (2.39) при $W_s = 0$.

Из уравнения (2.40) видно, что приближенная величина минимальной ширины линии тензорезистора определяется требуемым числом квадратов и минимальной площадью тензорезистора (зависящей от требований по мощности). Отношение ширины промежутка между линиями к ширине линии (W_s / W_l) оказывает влияние на результаты расчета, но обычно $W_s / W_l \approx 1$ и влияние мало. На рисунке 2.20 приведены результаты расчета по уравнению (2.40) для случая $W_s / W_l = 1$.

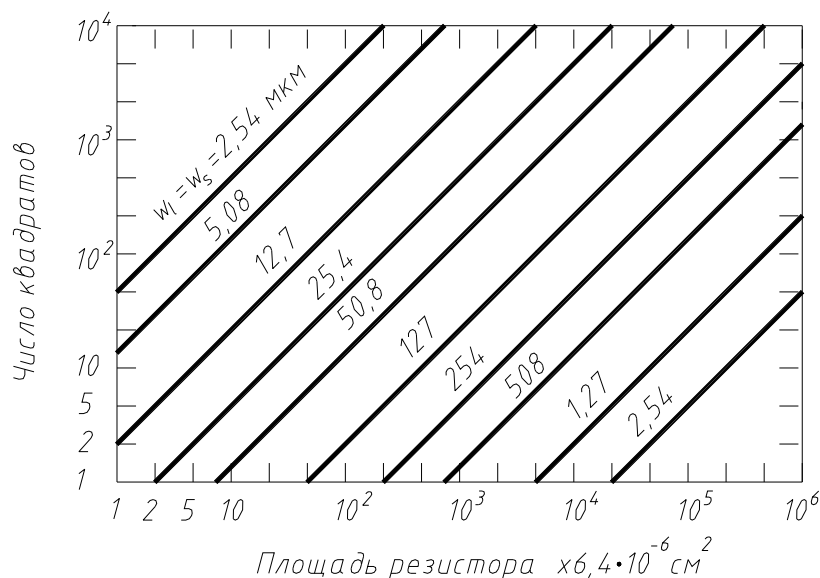


Рисунок 2.20 – Зависимость числа квадратов в линии тензорезистора от площади для тензорезистора с конфигурацией типа «меандр»

Видно, что для получения низкоомных мощных тензорезисторов необходимы широкие линии, тогда как маломощные высокоомные тензорезисторы могут быть получены и при очень узких линиях. В действительности минимальная толщина линии (определяемая в основном на основании требований по мощности) может быть настолько мала, что ее будет невозможно получить технологически.

Для обеспечения высокого уровня выхода годных в процессе производства необходимо установить верхний предел величины n . Вероятность повреждения и образования дислокаций на поверхности тензорезистора тем больше, чем длиннее полоска тензорезистора. В то же время более узкие полоски более уязвимы, так как дефекты с меньшими размерами будут приводить к повреждению тензорезистора. Если общее число квадратов всех тензорезисторов на одной подложке становится слишком большим, выход годных схем падает. Таким образом, суммарное сопротивление тензорезисторов на подложке является более существенной величиной, чем число тензорезисторов или значение сопротивления любого отдельного тензорезистора. Обычно полное число квадратов ограничено величиной порядка 50 000 из соображений процента выхода годных с подложки, оптимальной ширины линии и общей площади. Тогда верхний предел суммарного сопротивления на подложке $\sum R < 5 \cdot 10^4 \rho_s$ [39].

Существует также практический нижний предел числа квадратов любого отдельно тензорезистора. Может оказаться затруднительным изготовить конфигурацию, состоящую из менее чем одного квадрата, с требуемой точностью. Кроме того, подгонка сопротивления оказывается более сложной.

Число квадратов

При выводе уравнения (2.40) не учитывался вклад участков прямоугольных изгибов резисторной линии. Если необходимо получить точное соотношение сопротивлений в конфигурации схемы, сопротивление этих участков должно быть учтено.

В области изгиба плотность тока не остается однородной (рисунок 2.21) [44].

Это приводит к сокращению электрической длины тензорезистора и уменьшению его сопротивления. Неравномерное распределение плотности тока наблюдается в пределах трех квадратов области изгиба (рисунок 2.22).

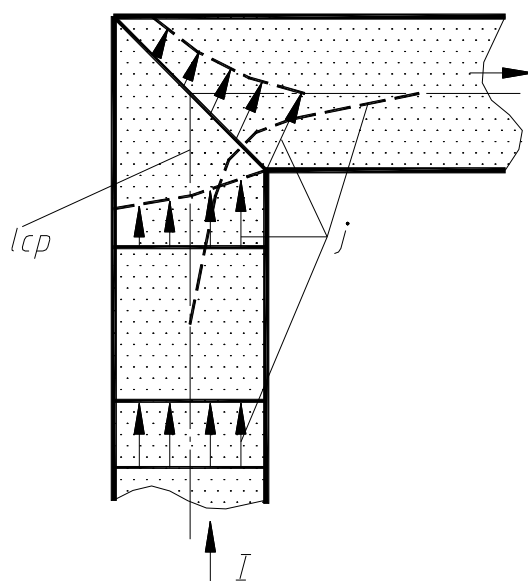
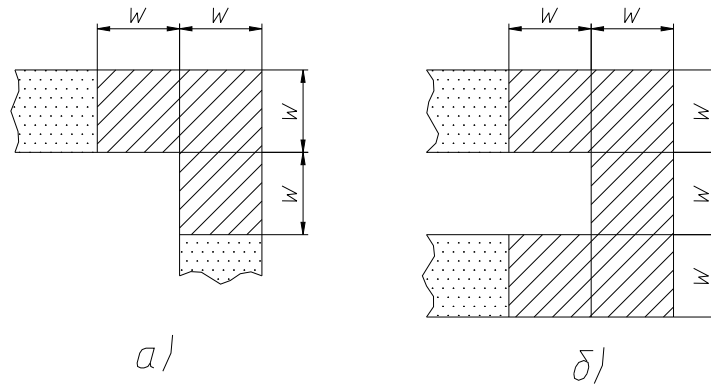


Рисунок 2.21 – Распределение плотности тока в тензорезисторах типа «мeандр»



a – изгиб под прямым углом; *б* – П-образный изгиб

Рисунок 2.21 – Конструкции изгибов тензорезисторов типа «меандр»

В связи с этим необходимо более точно интерпретировать понятие квадрата материала тензорезистора. Чтобы уравнения (2.38)-(2.40) оставались справедливыми, необходимо определить число квадратов, связанных с участками изгибов или других геометрических отклонений, путем подсчета их вклада в сопротивление. При этом удобно сохранить обычный расчет для прямолинейных участков $\left(\frac{l_1}{W_1}\right)$ и приписать специальное число «квадрату» участка в углах. В действитель-

ности плотность тока и эквивалентные линии нарушаются также и на части прямолинейного участка и, следовательно, вклад этой части не равен $\left(\frac{l_1}{W_1}\right)$. Влияние

этого фактора будет обсуждено ниже. Существует несколько способов решения этой задачи, но наиболее простым является конформное отображение. После одного или нескольких соответствующих преобразований системы координат данная частная геометрия отображается в линейную конфигурацию прямоугольной формы, показанную на рисунке 2.19 *a*. Результаты ряда таких расчетов приведены на рисунке 2.23 [42].

Из рисунка 2.23 *a* явствует, что вклад области изгиба простого прямого угла составляет 0,559 квадрата основной линии резистора. Эта величина является точной, если угол составлен двумя прямыми достаточно длинными линиями, и остается хорошим приближением, даже когда $l_2=W$. Когда $l_2=W/2$, более точным приближением будет значение 0,556. Как видно из рисунка 2.23 *б*, когда l_2 стремится к нулю, вклад угла будет равен 0,469 квадрата, т. е. снизится лишь на 0,090 квадрата.

Наличие даже малого закругления на внутреннем угле прямоугольного изгиба приводит к уменьшению числа квадратов, приписываемых углу [43]. Для малых радиусов закругления r это уменьшение приближенно описывается выражением:

$$\Delta n = -0,6 \left(\frac{r}{W} \right)^{\frac{4}{3}}, \quad (2.41)$$

при $r < \frac{W}{2}$.

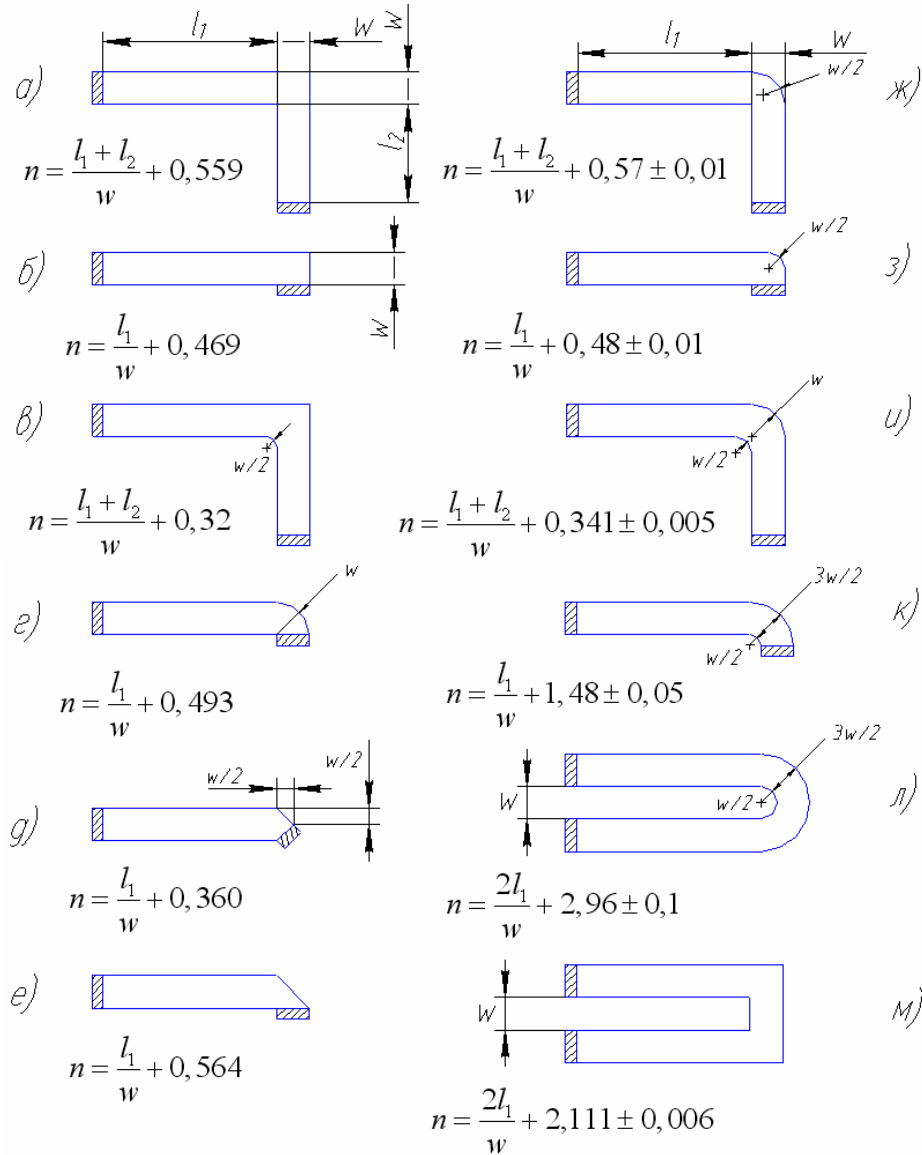


Рисунок 2.23 – Эффективные числа квадратов для различных конфигураций линий резисторов

Часто внутренний радиус создается умышленно для снижения плотности тока, обычно повышенной у резкого угла. В мощных тензорезисторах повышение плотности тока приводит к появлению перегретых участков, которые могут вызывать избыточное изменение сопротивления этих участков. На рисунке 2.23 приведены решения для прочих типов изгибов. Если решение, является приближенным, указывается также значение погрешности.

Метод конформных отображений может быть использован и в случае более сложных геометрий, которые разбиваются на участки простой формы. В качестве

примера, представляющего интерес для некоторых высокочастотных резисторов, рассматривается конфигурация типа решетки, показанная на рисунке 2.24.

Такая конфигурация применяется, когда необходимо создать короткий и широкий резистор с малой индуктивностью, но обладающий заданным сопротивлением. Дополнительным достоинством взаимно пересекающегося рисунка является то, что разрыв или поры в любой из узких линий, образующих рисунок, приводит лишь к незначительному изменению общего сопротивления.

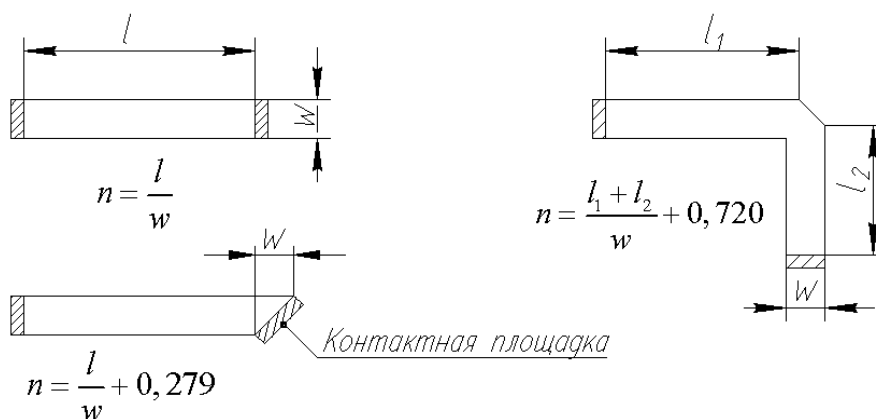
Определенный интерес представляют геометрии с резким изменением ширины линии, примеры которых приведены на рисунке 2.25.

Число квадратов в симметричном прямоугольном сегменте, показанном на рисунке 2.25 а, равно:

$$n = \frac{l_1}{W_1} + \frac{l_2}{W_2} + \frac{1}{2\pi} \left[\frac{S^2 + 1}{S - 1} \ln \left(\frac{S + 1}{S - 1} \right) - 2 \ln \left(\frac{4S}{S^2 - 1} \right) \right],$$

где $S = \frac{W_2}{W_1}$ и $l_2 > \frac{W_2}{3}$.

График зависимости величины Δn от $\frac{l_2}{W_1}$ для малых l_2 приведен на рисунке 2.26.



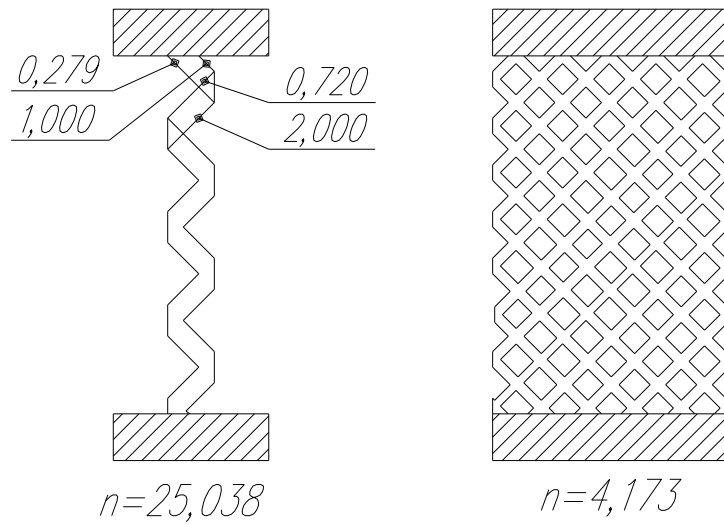


Рисунок 2.24 – Решетчатая конфигурация тензорезистора и ее составные части

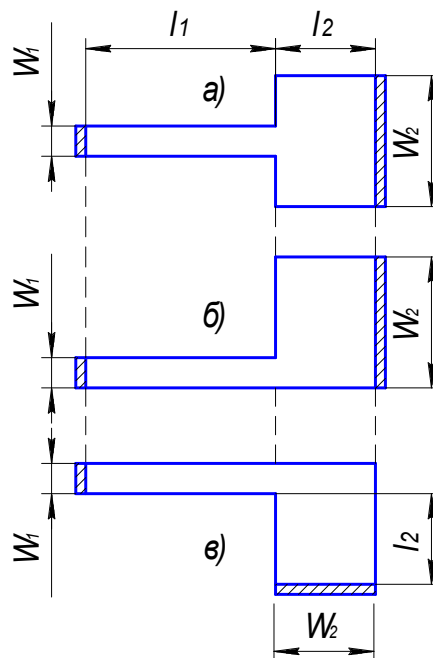


Рисунок 2.25 – Конфигурация тензорезистора с резким изменением ширины линии

Для несимметричной формы резистора (см. рисунок 2.25, б) число квадратов равно:

$$n = \frac{l_1}{W_1} + \frac{l_2}{W_2} + \frac{1}{\pi} \left[\frac{S^2 + 1}{S} \ln \left(\frac{S+1}{S-1} \right) - 2 \ln \left(\frac{4S}{S^2 - 1} \right) \right],$$

где $S = \frac{W_2}{W_1}$ и $l_2 > \frac{2W_2}{3}$.

Число квадратов в прямоугольном изгибе с изменением ширины линии (см. рис. 2.25, в) равно:

$$n = \frac{l_1}{W_1} + \frac{l_2}{W_2} + \frac{1}{S} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\frac{4S}{S^2 - 1} \right) + \frac{S^2 - 1}{\pi S} \cos^{-1} \left(\frac{S^2 - 1}{S^2 + 1} \right),$$

где $S = \frac{W_2}{W_1}$ и $l_2 \gg W_2$.

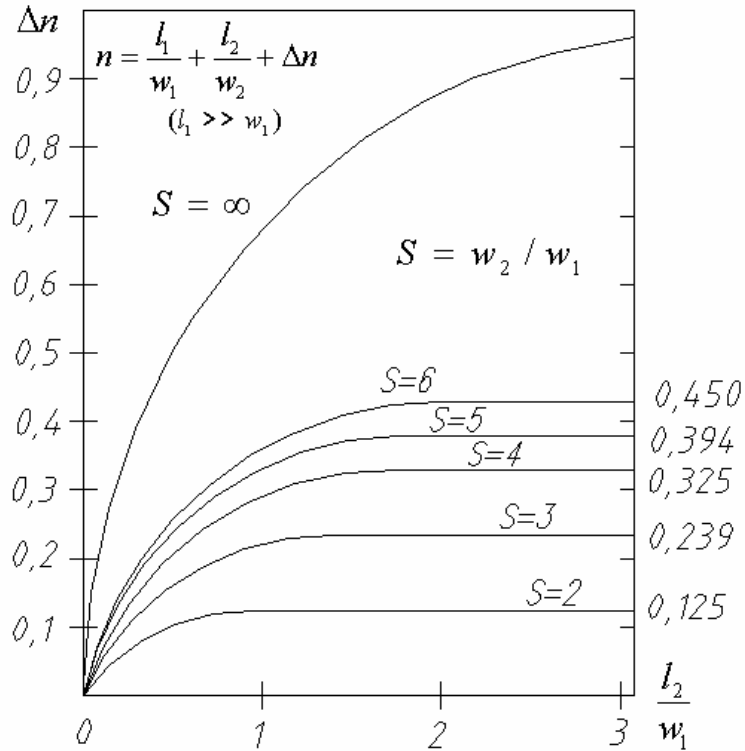


Рисунок 2.26 – Зависимость числа квадратов линии с резким изменением ширины от относительной длины широкой части линии (см. рисунок 2.25, а) [42]

При наличии малого радиуса закругления r на внутреннем угле изгиба число квадратов уменьшается на

$$\Delta n = -0,4 \left(\frac{S^2 + 1}{S} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{r}{\sqrt{W_1 W_2}} \right)^{\frac{4}{3}}, \quad (2.42)$$

если r меньше половины ширины наиболее узкой линии. Если $W_1 = W_2$, уравнение (2.42) переходит в (2.41).

Конфигурации с изменяющейся шириной линии применяются в основном для токоведущих дорожек, однако такие конфигурации могут применяться и в случае резисторов для выполнения специальных функций.

Влияние ошибок совмещения на погрешность сопротивления тензорезистора

В ПТЧЭ, представленном на рисунке 2.1, как и в большинстве подобных изделий, контакт к тензорезисторам образован с помощью металлизированной коммутации (например, алюминиевой), покрывающей легированный слой до начала

топологического размещения тензорезистора, как показано на рисунке 2.27, где подобный вариант рассмотрен на примере тензорезистора $R1$.

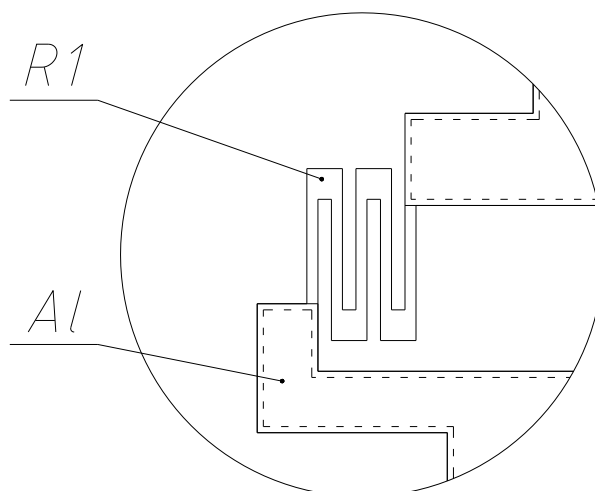


Рисунок 2.27 – Металлизированная коммутация к тензорезистору

На практике, на поверхности легированного слоя в процессе технологического изготовления ПТЧЭ, формируют слой двуоксида кремния толщиной несколько десятых долей микрометра, который служит защитой для тензорезисторов, предохраняя их поверхность от попадания на нее влаги, загрязнений, приводящих к изменению сопротивления тензорезистора в процессе эксплуатации. Поэтому перед нанесением металлизации, для обеспечения надежного контакта с легированной областью, необходимо удалить данный защитный слой в тех местах, которые будут контактировать с проводящим слоем (см. п. 3.4). Однако при проведении процесса фотолитографии по формированию так называемых окон в защитном слое, возникают неизбежные погрешности совмещения, приводящие к изменению конечного сопротивления тензорезистора. Кроме того, площадь окон не должна превышать площадь металлизации во избежание образования электрической связи между металлизацией (а значит и тензорезисторами) и подложкой. На рисунке 2.27 пунктирной линией показана граница окон в защитном слое, то есть алюминиевая металлизация надежно контактирует с легированным слоем и одновременно не является причиной образования контакта между тензорезисторами и подложкой. Однако в этом случае неизбежен эффект смещения проводящего слоя (металлизации) относительно легированного слоя (тензорезистора), приводящий к относительной погрешности сопротивления тензорезистора.

С целью оценки данной погрешности, рассмотрим упрощенную конструкцию тензорезистора, полученного при смещении слоев, представленную на рисунке 2.27 [45].

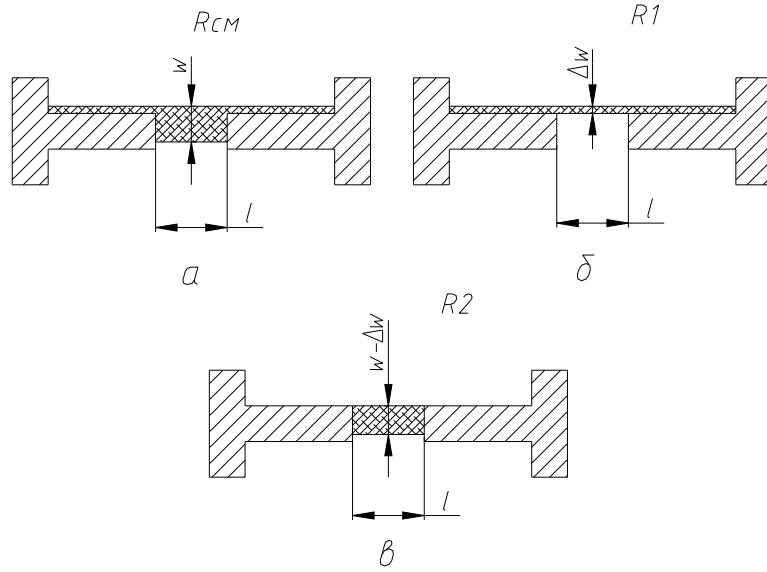


Рисунок 2.27

Конфигурацию резистора $R_{см}$ можно представить в виде двух параллельно соединенных резисторов $R1$, $R2$, формы которых приведены на рисунке 2.27, б, в. Сопротивления резисторов $R1$, $R2$ будут определяться выражениями:

$$R1 = \rho \left[(l / \Delta W) + 2n \right];$$

$$R2 = \rho \left[l / (W - \Delta W) \right],$$

где ΔW – величина смещения;

n – число квадратов углового участка резистора $R1$.

Определим сопротивление $R_{см}$:

$$\begin{aligned} R_{см} &= \rho \frac{K1_{\phi} K2_{\phi}}{K1_{\phi} + K2_{\phi}} = \frac{\left[(l / \Delta W) + 2n \right] l / (W - \Delta W)}{(l / \Delta W) + 2n + l / (W - \Delta W)} = \\ &= \rho \frac{l(l + 2nW)}{lW + 2n\Delta W(W - \Delta W)} = \rho K_{\phi см}, \end{aligned}$$

где $K_{\phi см}$ – коэффициент формы резистора $R_{см}$ (отношение длины резистора к его ширине).

Преобразуем величину $K_{\phi см}$ путем деления числителя и знаменателя на lW . Обозначая $K_{\phi} = l/W$ и $\delta W = \Delta W/W$, находим:

$$\begin{aligned} K_{\phi см} &= \frac{l / W + 2n\Delta W / W}{1 + 2n\Delta W W / lW - 2n\Delta W^2 / l2} = \frac{K_{\phi} + 2n\delta W}{1 + 2n\delta W / K_{\phi} - 2n\delta W^2 / K_{\phi}} = \\ &= \frac{K_{\phi} (K_{\phi} + 2n\delta W)}{K_{\phi} + 2n\delta W - 2n\delta W^2} = \frac{K_{\phi}}{1 - \left[2n\delta W^2 / (K_{\phi} + 2n\delta W) \right]}, \end{aligned}$$

где $K_{\phi} = l/W$ – коэффициент формы резистора $R_{см}$ при $\delta W = 0$, то есть при отсутствии смещения слоев.

Найдем относительную погрешность коэффициента формы резистора $R_{см}$:

$$\delta K_{\phi} = \frac{K_{\phi см} - K_{\phi}}{K_{\phi}} = \frac{1}{1 - \left[2n\delta W^2 / (K_{\phi} + 2n\delta W) \right]} - 1. \quad (2.43)$$

Как видно из (2.43), погрешность коэффициента формы будет определяться величиной смещения δW и коэффициентом формы несмещенного резистора K_ϕ . Задаваясь величинами δW и K_ϕ , можно определить погрешность резистора за счет смещения слоев. Необходимо отметить, что $\delta W = f(K_\phi)$. При $K_\phi \geq 1$ величина $\delta W = \text{const}$, так как $W = \text{const}$, $l = \text{var}$. При $K_\phi < 1$ величина δW уменьшается, так как увеличивается размер W . Для $l_3 = \Delta W$ (l_3 – длина электрода смещенного резистивного элемента) число квадратов углового участка резистора $R1$ (см. рисунок 2.27, б) составляет: $n = 0,461$, а для $l_3 = 3\Delta W$ величина $n = 0,436$ [45].

2.5 Температурная зависимость характеристик полупроводниковых тензочувствительных элементов. Температурная компенсация измерительного моста

В мостовых схемах на основе полупроводниковых тензорезисторов по сравнению со схемами на основе металлических тензорезисторов отмечается сравнительно сильная зависимость коэффициента тензочувствительности от температуры, что в ряде случаев приводит к существенным температурным погрешностям. Такие схемы после изготовления представляют собой неуравновешенные мосты с выходным сигналом при начальной температуре не равным нулю, а при изменении температуры от начальной до максимальной еще и дополнительно изменяющимся. Уменьшить эту зависимость можно с помощью компенсационных методов и схем, когда неуравновешенные мосты преобразовываются в уравновешенные с выходным сигналом, не зависящим от изменения температуры; при этом важную роль играет температурная зависимость сопротивления и коэффициента K . Кривая зависимости сопротивления от температуры имеет чрезвычайно большую кривизну, что затрудняет компенсацию.

Для компенсации температурной погрешности применяются два метода – физико-технологический и схемотехнический. Физико-технологический метод используется при питании моста постоянным током [16, 56]. Обычно такое питание применяется в датчиках давлений с унифицированным выходным сигналом. Самостоятельные тензометрические преобразователи, имеющие в своем составе ПТЧЭ, как правило, питаются от источника напряжения. За рубежом такие преобразователи давно и широко используются в системах контроля и управления, а в последнее время такие преобразователи используются и отечественными потребителями. В этом случае для эффективной термокомпенсации выходного сигнала используется схемотехнический метод.

Задача температурной компенсации неоднократно рассматривалась в ряде работ [12, 10, 13, 14, 15, 16, 54, 56, 58, 65], где наиболее полно представлены различные подходы к термокомпенсации, предложены оригинальные схемы построения, однако данная задача не является полностью решенной, поскольку требует разработки определенной методики и упрощения расчетов. Кроме того, для каждого конкретного ПТЧЭ требуется индивидуальный подход к построению подобных схем в зависимости от сопротивлений тензорезисторов, коэффициента тензочувствительности, диапазона рабочих температур, давлений датчика, в со-

став которого входит ПТЧЭ и т.д. Таким образом, невозможно построить универсальную схему термокомпенсации, подходящую для любого ПТЧЭ, можно лишь выбрать или вновь разработать методику, наиболее пригодную для широкого класса элементов. Поэтому задачей данной главы является рассмотрение общих вопросов термокомпенсации моста, включающие автокомпенсацию, параллельное и последовательное подключение терморезисторов, а также принцип расчета компенсирующего устройства при питании измерительной схемы от источника напряжения или тока.

Температурная зависимость характеристик датчиков давлений на основе ПТЧЭ, в первую очередь, определяется физическими свойствами полупроводников, а также особенностями конкретного конструктивного исполнения ПТЧЭ в корпусе датчика. Рассмотрим эти факторы и соответствующие методы термокомпенсации.

Зависимость подвижности и концентрации носителей заряда в полупроводнике от температуры обуславливает температурную зависимость сопротивления ненагруженного тензорезистора. Последнюю характеризует ТКС, значение и знак которого определяются типом и концентрацией носителей заряда (см. также п. 2.2). ТКС зависит от характера распределения примесей, и, следовательно, будет определяться также и структурой тензорезистора. В равномерно легированных тензорезисторах ТКС определяется объемной концентрацией примесей, а в диффузионных – поверхностной. На рисунке 2.28 показана зависимость ТКС диффузионных тензорезисторов p -типа проводимости от поверхностной концентрации примесей бора [10, 25].

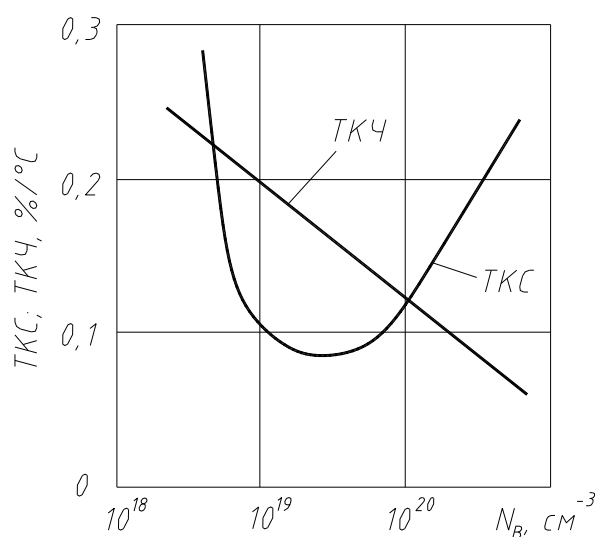


Рисунок 2.28

Как видно из рисунка, зависимость ТКС имеет минимум при поверхностной концентрации примесей около $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Это означает, что для снижения ТКС тензорезистора и влияния на него технологического разброса поверхностную концентрацию необходимо выбрать вблизи указанного выше значения. Это особенно важно при включении тензорезисторов в симметричные схемы (мостовые,

дифференциальные), так как температурный дрейф нуля этих схем определяется уже не абсолютной величиной ТКС тензорезисторов, а их разбросом внутри схемы.

Таким образом, одним из конструктивно-технологических методов термостабилизации характеристик ПТЧЭ является правильный выбор степени легирования. Как правило, он определяется в результате компромисса между желаемыми чувствительностью и термостабильностью (см. также пп. 2.2.1, 2.2.2).

Из рисунка 2.28 видно, что выбор степени легирования тензорезистора определяет не только его ТКС, но и температурный коэффициент чувствительности (ТКЧ). Изменением концентрации примесей можно получить определенное соотношение между ТКС и ТКЧ, что, в свою очередь, может обеспечить компенсацию температурных погрешностей датчиков давлений на основе ПТЧЭ, когда происходит как бы автокомпенсация температурной погрешности преобразования, поскольку при питании измерительной схемы от генератора тока уменьшение выходного сигнала в результате падения тензочувствительности ПТЧЭ точно компенсируется увеличением напряжения питания благодаря росту сопротивления тензорезисторов. Подобная автокомпенсация ПТЧЭ может быть использована для создания высокоточных датчиков давлений, работающих в широком диапазоне температур (по крайней мере, от минус 200 до 200°C) и не требующих дополнительной схемной компенсации температурной погрешности. Как показали исследования, явление автокомпенсации может иметь место в ПТЧЭ вплоть до температур порядка 500°C [59].

Зависимость главных тензорезистивных коэффициентов от температуры вызывает соответствующую зависимость чувствительности датчиков давлений на основе ПТЧЭ. Последняя определяется температурной зависимостью тензочувствительности тензорезистора, которая характеризуется ТКЧ:

$$\gamma_K = \frac{\Delta K}{\Delta T},$$

где K определяется выражением (2.2).

С учетом допущений (2.10), (2.11), то есть полагая, что

$$\pi_{11} \cong \pi_{12} \cong 0$$

для кремния p -типа проводимости, и

$$\pi_{44} \cong 0; \pi_{11} \cong -2\pi_{12}$$

для кремния n -типа проводимости, а также пренебрегая температурной зависимостью модуля Юнга, ТКЧ можно представить как:

$$\gamma_K = \Delta \pi_{ii} / \Delta T,$$

где $i=1$ или $i=4$ для тензорезисторов n - и p - типа проводимости соответственно.

Зависимость главных тензорезистивных коэффициентов от температуры и концентрации примесей подробно рассмотрена в пп. 2.2.1, 2.2.2.

Как и для других полупроводниковых тензопреобразователей, температурная зависимость выходного сигнала в ПТЧЭ датчиков давлений является главным источником дополнительной погрешности преобразования. В некоторых датчиках

давлений уменьшение температурной погрешности достигается отдельной компенсацией температурной зависимости выходного сигнала ПТЧЭ и температурной зависимости параметров электронной схемы преобразования сигнала [55]. Такой подход позволяет значительно уменьшить трудоемкость изготовления датчиков в серийном производстве, а также выпускать ПТЧЭ датчиков давлений как самостоятельные средства измерения, которые все более широко используются в системах измерений и контроля.

Рассмотрим требования, предъявляемые к материалам и конструкции «идеально стабильного ПТЧЭ», выходной сигнал датчика, построенного на основе данного ПТЧЭ, не зависит от температуры. Для определенности возьмем ПТЧЭ с наиболее широко распространенной тензочувствительной схемой в виде активного моста с четырьмя тензорезисторами $R_1 - R_4$, два из которых (R_1 и R_3) увеличивают свое сопротивление под влиянием деформации ПТЧЭ, вызванной воздействием измеряемого механического параметра P (давления), а два других (R_2 и R_4) – уменьшают. Будем считать, что начальные сопротивления тензорезисторов при отсутствии деформации ПТЧЭ одинаковы, то есть мост сбалансирован при начальной температуре T_0 и $R_1 = R_3$, а $R_2 = R_4$.

Сопротивления R_j тензорезисторов зависят как от деформации ε , так и от температуры T :

$$R_j = R_j(\varepsilon, T), j = 1, 2.$$

Деформация ε пропорциональна измеряемому механическому параметру P :

$$\varepsilon = A(T)P,$$

где $A(T)$ – коэффициент упругого преобразования определяется конструкцией тензопреобразователя и упругими характеристиками применяемых в нем материалов.

Следует различать аддитивную и мультипликативную составляющие температурной погрешности, поскольку они имеют различное происхождение и вносят разный вклад в суммарную температурную погрешность.

Аддитивная составляющая (температурный дрейф начального сигнала в зависимости от температуры при $P=0$) определяется разностью ТКС тензорезисторов в смежных плечах моста:

$$\gamma_{R_j} = \frac{1}{R(0, T)} \frac{\delta R(0, T)}{\delta T}.$$

Кроме того, в некоторых ПТЧЭ аддитивная составляющая связана с температурными напряжениями подложки, возникающими из-за разности коэффициентов температурного расширения составляющих подложку материалов. Эта составляющая (по абсолютной величине) не зависит от выходного сигнала ПТЧЭ, так что ее вклад тем больше, чем меньше чувствительность ПТЧЭ к измеряемому давлению. Реализация ТКС тензорезисторов определяются, в основном, технологическим разбросом электрофизических характеристик слоя кремния и геометрических размеров тензорезисторов. Современная технология обеспечивает равенство ТКС тензорезисторов на одном ПТЧЭ с погрешностью не хуже 0,2%, что вызывает температурный дрейф нуля ПТЧЭ не более 0,02-0,05 % /10°С.

Мультипликативная составляющая (температурный дрейф чувствительности (диапазона выходного сигнала)) связана с температурной зависимостью коэффициента тензочувствительности ПТЧЭ (электрофизических характеристик материала ПТЧЭ) и упругих параметров материалов подложки; ее относительное значение не зависит от выходного сигнала ПТЧЭ.

Запишем сопротивление тензорезистора в мостовой тензочувствительной схеме в виде:

$$R_j(\varepsilon, T) = R(T)[1 + K_j(\varepsilon, T)\varepsilon], j = 1, 2,$$

где $K_j(\varepsilon, T)$ – коэффициент тензочувствительности тензорезистора.

Тогда выходной сигнал ПТЧЭ равен [4]:

$$U_u(\varepsilon, T) = U^0 \varepsilon \frac{K_1(\varepsilon, T) - K_2(\varepsilon, T)}{2 + K_1(\varepsilon, T)\varepsilon + K_2(\varepsilon, T)\varepsilon} \cong U^0 K(\varepsilon, T)\varepsilon, \quad (2.44)$$

при питании мостовой схемы от источника напряжения U^0 и

$$U_i(\varepsilon, T) = \frac{i^0}{2} R(T)[K_1(\varepsilon, T) - K_2(\varepsilon, T)]\varepsilon = i^0 R(T) K(\varepsilon, T)\varepsilon, \quad (2.45)$$

при питании схемы от источника тока i^0 .

В выражениях (2.44) и (2.45) $K(\varepsilon, T) = \frac{1}{2}[K_1(\varepsilon, T) - K_2(\varepsilon, T)]$ – коэффициент тензочувствительности ПТЧЭ. В выражении (2.44) учтено, что при ориентации тензорезисторов в плоскости (001) по направлениям $\langle 110 \rangle$ $K_1(\varepsilon, T) \cong -K_2(\varepsilon, T)$ в широком диапазоне температур.

Выходной сигнал ПТЧЭ не зависит от температуры при условии, что:

$$\frac{1}{U(P, T)} \frac{\delta U(P, T)}{\delta T} = 0.$$

Если ввести обозначения:

$$\gamma_K = \frac{1}{K(\varepsilon, T)} \frac{\delta K(\varepsilon, T)}{\delta T} - \text{ТКЧ ПТЧЭ, а}$$

$\gamma_A = \frac{1}{A(T)} \frac{\delta A(T)}{\delta T}$ – температурный коэффициент упругого преобразования ПТЧЭ (ТКУП), то условие независимости чувствительности ПТЧЭ от температуры можно записать в виде:

$$\gamma_K + \gamma_A = 0, \text{ или } \gamma_K + \gamma_R + \gamma_A = 0,$$

при питании мостовой измерительной схемы ПТЧЭ соответственно от источников напряжения или тока. А так как в абсолютном большинстве случаев $|\gamma_A| \ll |\gamma_R|, |\gamma_K|$ получаем, что температурные изменения чувствительности ПТЧЭ определяются, главным образом, характеристиками полупроводникового материала тензорезисторов. Следовательно, чувствительность ПТЧЭ не зависит от температуры, если во всем рабочем диапазоне температур выполняются условия:

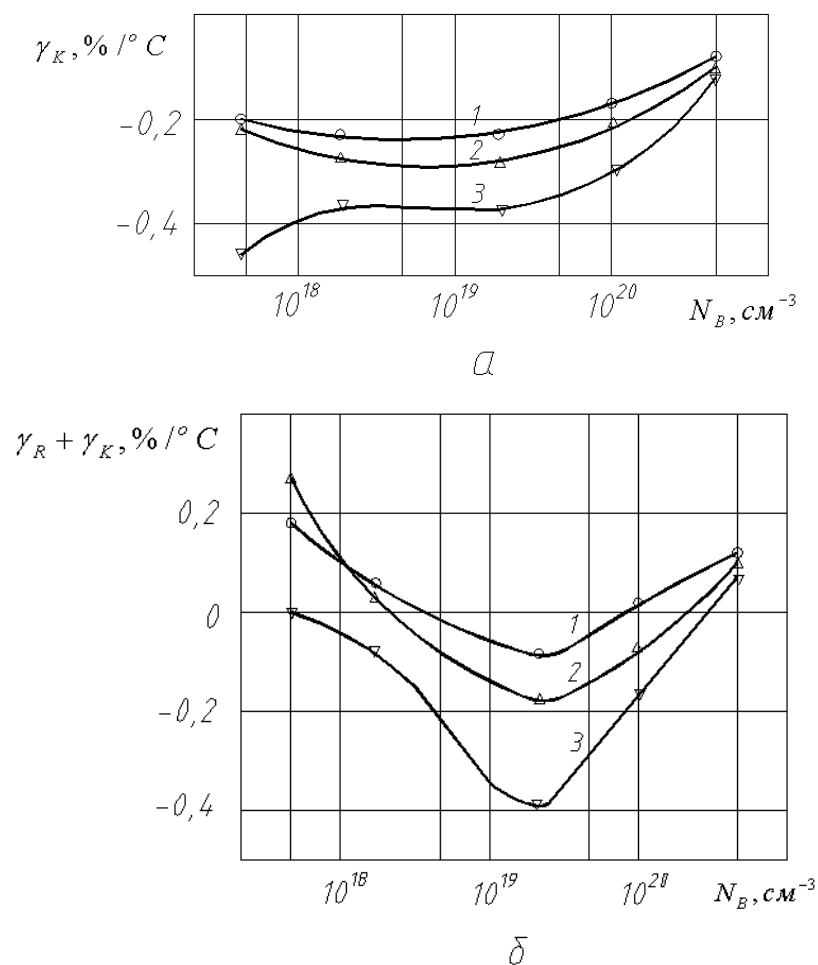
$$\gamma_K \cong 0, \quad (2.46)$$

при питании мостовой схемы от источника напряжения и

$$\gamma_K + \gamma_R \cong 0, \quad (2.47)$$

при питании схемы от источника тока.

В литературе для ТКС и ТКЧ используются чаще всего выражения, полученные из линеаризованных температурных зависимостей сопротивления и тензочувствительности. При этом, как видно из выражения (2.45), обращение в нуль суммы ТКС и ТКЧ не обеспечивает температурную стабильность чувствительности тензопреобразователя. Для уменьшения температурной зависимости датчиков давлений с ПТЧЭ используется питание мостовой тензосхемы от генератора тока [60, 61], но получить постоянную чувствительность в достаточно широком диапазоне температур для таких ПТЧЭ практически невозможно [61]. На рисунке 2.29 показаны зависимости коэффициентов γ_K и $\gamma_R + \gamma_K$ от поверхностной концентрации дырок N_B для мембранных ПТЧЭ с диффузионными тензорезисторами, рассчитанные по данным фирмы Schlumberger (Франция) [62] (см. также рисунок 2.28).



a – Зависимость ТКЧ; *б* – зависимость суммы ТКС и ТКЧ

1 – при температуре 120°C; 2 – при 40°C; 3 – при минус 40°C

Рисунок 2.29

Как видно из рисунка, условия (2.46) и (2.47) не выполняются ни при каких значениях N_B в более или менее широком интервале температур. Поэтому обычно в ПТЧЭ используют тензорезисторы с $N_B \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и питают схему от источника тока, а получающуюся нелинейную температурную зависимость чувствитель-

ности датчика давления на основе ПТЧЭ компенсируют с помощью различных электронных схем.

Поскольку методы термокомпенсации ПТЧЭ при питании от источника тока и от источника напряжения существенно различаются, то целесообразно рассмотреть их отдельно и сравнить эффективность этих методов.

2.5.1 Температурная компенсация при питании током

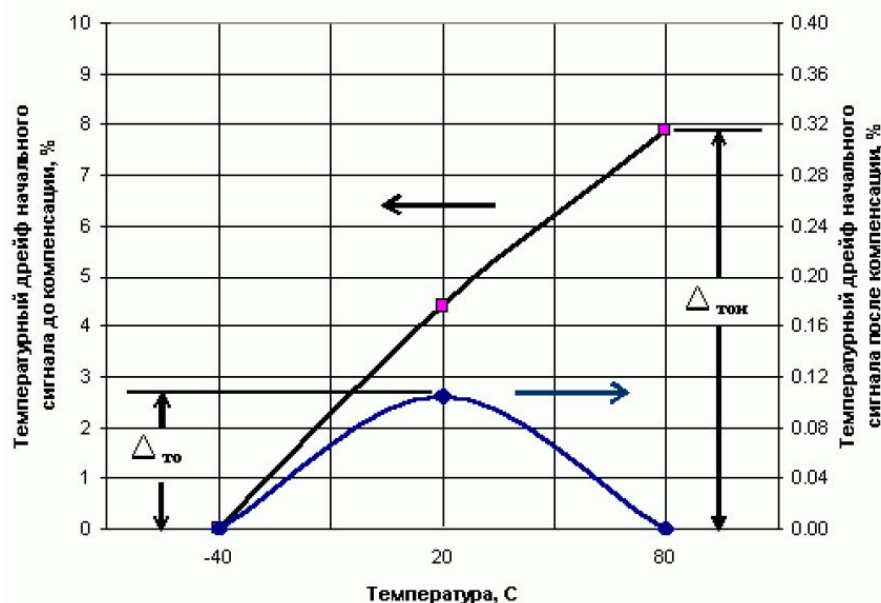
Один из вариантов температурной компенсации ПТЧЭ при питании током рассмотрим на примере методики, предложенной в [16].

Возможности физико-технологического метода компенсации и аддитивной составляющей температурной погрешности ПТЧЭ при питании от источника тока связаны с особенностями топологии тензорезистивной схемы, в которой кроме тензорезисторов включены элементы балансировки замкнутого тензомоста, позволяющие разрывом перемычек изменять начальный выходной сигнал моста практически без изменения ТКС его плеч. В этом случае можно установить такой начальный выходной сигнал с ПТЧЭ, что его значение не будет зависеть от температуры [57]. Значение этого сигнала $U_{0(опт.)}$ определяется следующим образом. При питании ПТЧЭ постоянным напряжением измеряются значения начального выходного сигнала U_0 при двух температурах: $U_0(T_1)$ и $U_0(T_2)$; одновременно измеряются значения сопротивления диагонали питания тензомоста $R_m(T_1)$ и $R_m(T_2)$. Значение оптимального начального сигнала (при питании напряжением) определяется как:

$$U_{0(опт.)} = \frac{U_0(T_2) - U_0(T_1)}{\ln[R_m(T_1)/R_m(T_2)]}.$$

Если с помощью элементов балансировки и при питании постоянным напряжением установить такое значение начального сигнала измерительного моста, то при питании постоянным током начальный сигнал ПТЧЭ практически не будет зависеть от температуры. Конечно, при этом измерительный мост будет разбалансирован, но начальный разбаланс можно легко «убрать» при преобразовании электронной схемой в датчике.

Типичный результат такого метода компенсации аддитивной составляющей температурной зависимости показан на рисунке 2.30; видно, что аддитивная составляющая температурной погрешности уменьшается в десятки раз [16].



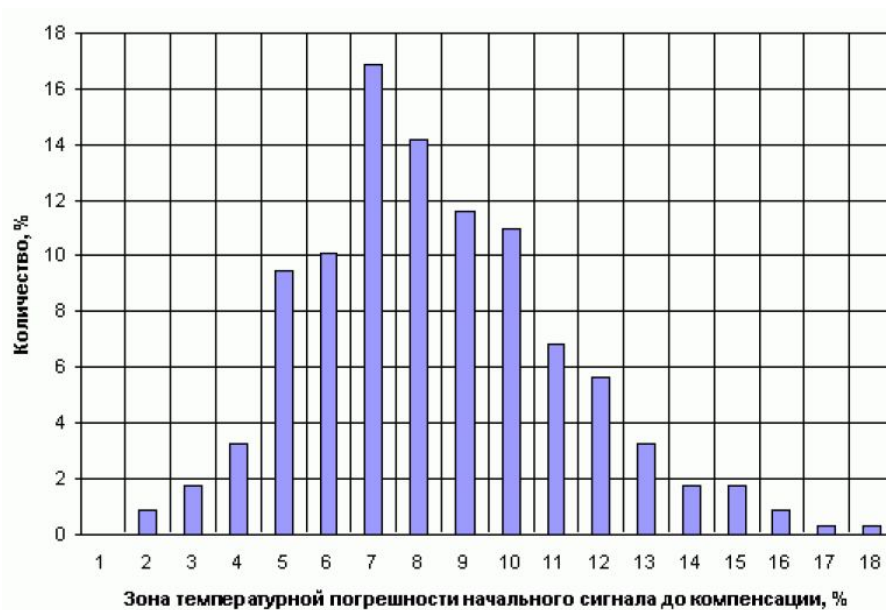
$\Delta_{то}$ — зона температурной погрешности нуля ПТЧЭ до компенсации; $\Delta_{тон}$ — зона температурной погрешности нуля ПТЧЭ после компенсации

Рисунок 2.30 — Температурный дрейф начального выходного сигнала до и после термокомпенсации для ПТЧЭ датчиков давления при питании током (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала)

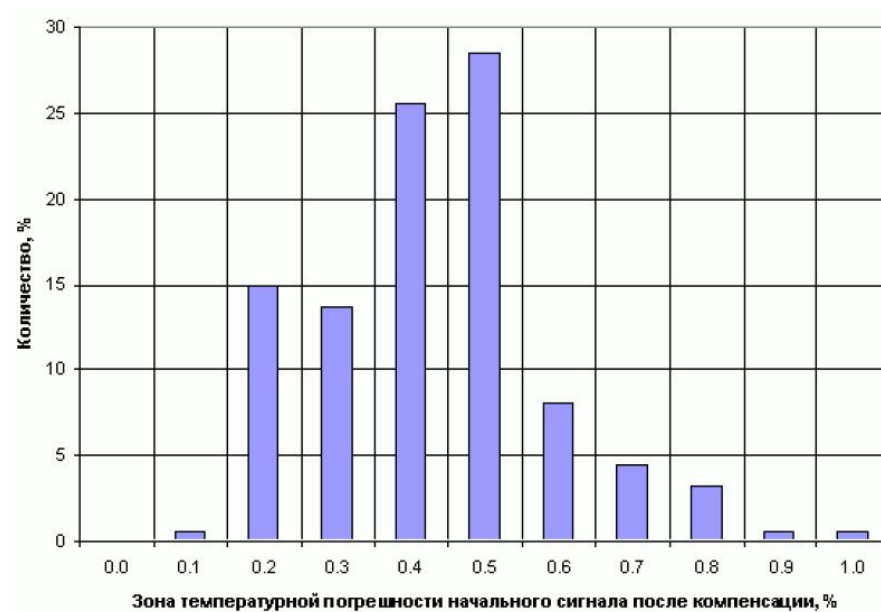
Вместе с тем, результирующая температурная зависимость начального сигнала близка к параболической. Поэтому для ее описания нельзя использовать стандартную нормировку дополнительной температурной погрешности в $\%/10^{\circ}\text{C}$ [63]; вместо этого имеет смысл говорить о максимальной зоне аддитивной температурной погрешности $\Delta_{то}$, подразумевая под ней максимальное изменение выходного сигнала в температурном диапазоне компенсации (см. рисунок 2.30). Такое нормирование дополнительной температурной погрешности вообще более правильно описывает свойства полупроводниковых ПТЧЭ, у которых линейные температурные зависимости параметров скорее исключение, чем правило.

Типичные результаты компенсации аддитивной температурной погрешности на примере датчиков давления МИДА-01П серийного производства, в которых питание ПТЧЭ осуществляется постоянным током, показаны на рисунке 2.31 [16].

Как видно, в среднем аддитивная температурная погрешность датчиков уменьшается почти в 20 раз по сравнению с исходной аддитивной температурной погрешностью ПТЧЭ (при этом следует учитывать, что в данные рисунка 2.31, б дает неучитываемый вклад аддитивная погрешность электронной схемы датчика).



a



б

a – Исходное распределение; средняя величина $\Delta_{\text{тон}} = 7.9 \%$; *б* – распределение после компенсации (в датчике); средняя величина $\Delta_{\text{то}} = 0.4 \%$

Рисунок 2.31 – Зона температурной погрешности начального сигнала ПТЧЭ при питании постоянным током в диапазоне температур от минус 40 до 80°C (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала ПТЧЭ). Верхний предел измерения 14 МПа, объем выборки 857 шт.

Как уже говорилось (см. (2.47)), возможность физико-технологической компенсации мультипликативной составляющей температурной погрешности возможна при определенном значении удельного сопротивления материала тензорезисторов, однако получить постоянную чувствительность в достаточно широком

диапазоне температур практически невозможно, что связано с изменением значения оптимального удельного сопротивления в зависимости от конструкции ПТЧЭ. Кроме того, для достижения приемлемой коррекции значение удельного сопротивления должно выдерживаться с высокой точностью (не хуже 1-2 %), тогда как практически ПТЧЭ формируются с разбросом удельного сопротивления $\pm(4 \dots 10)$ %. Поэтому на практике требуется дополнительное использование схемотехнической компенсации мультипликативной составляющей температурной погрешности ПТЧЭ, когда параллельно питающей диагонали измерительного моста включают термoneзависимый резистор R_0 (рисунок 2.32).

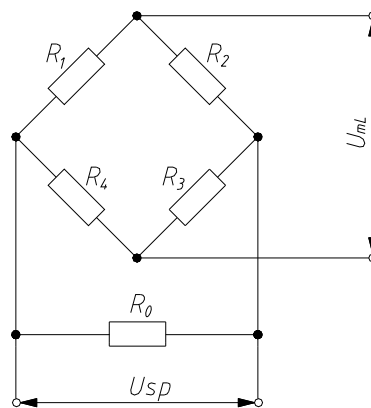


Рисунок 2.32 – Схема включения резистора для компенсации температурного дрейфа чувствительности при питании током

Значение R_0 рассчитывается по формуле [64]:

$$R_0 = R_M(T_1) \frac{\frac{R_M(T_2)}{R_M(T_1)} - \frac{U_D(T_2)}{U_D(T_1)}}{\frac{U_D(T_2)}{U_D(T_1)} - 1},$$

где T_1 и T_2 – границы интервала температурной компенсации;
 R_M – сопротивление питающей диагонали моста;
 U_D – диапазон изменения выходного сигнала ПТЧЭ при подаче максимального давления.

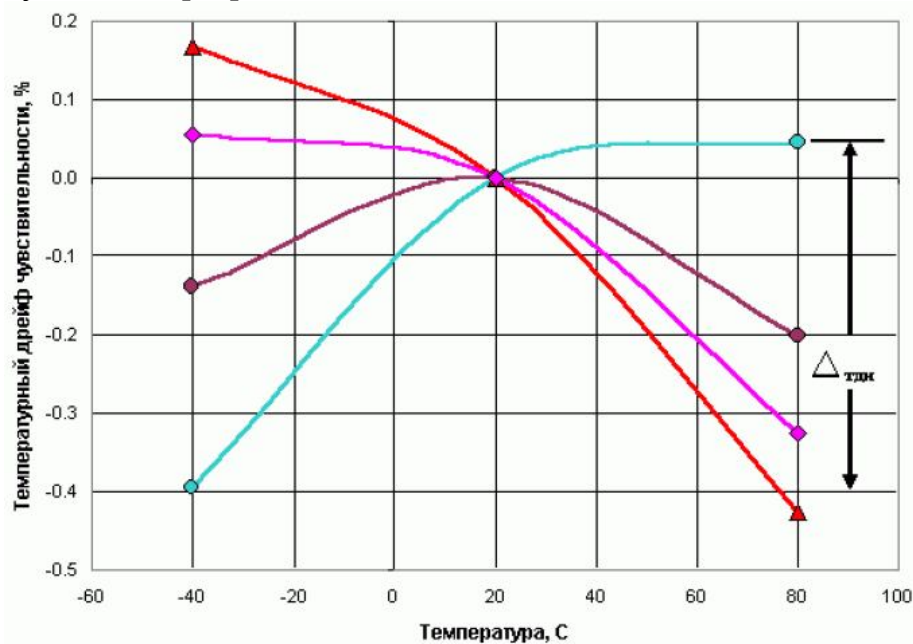
Использование термoneзависимого компенсирующего резистора R_0 позволяет устанавливать его на плате электронного преобразователя датчика, не заботясь о равенстве температур ПТЧЭ и резистора.

Результат использования указанного способа коррекции мультипликативной составляющей температурной погрешности ПТЧЭ, на примере датчиков давления МИДА-01П, показан на рисунке 2.33 [16].

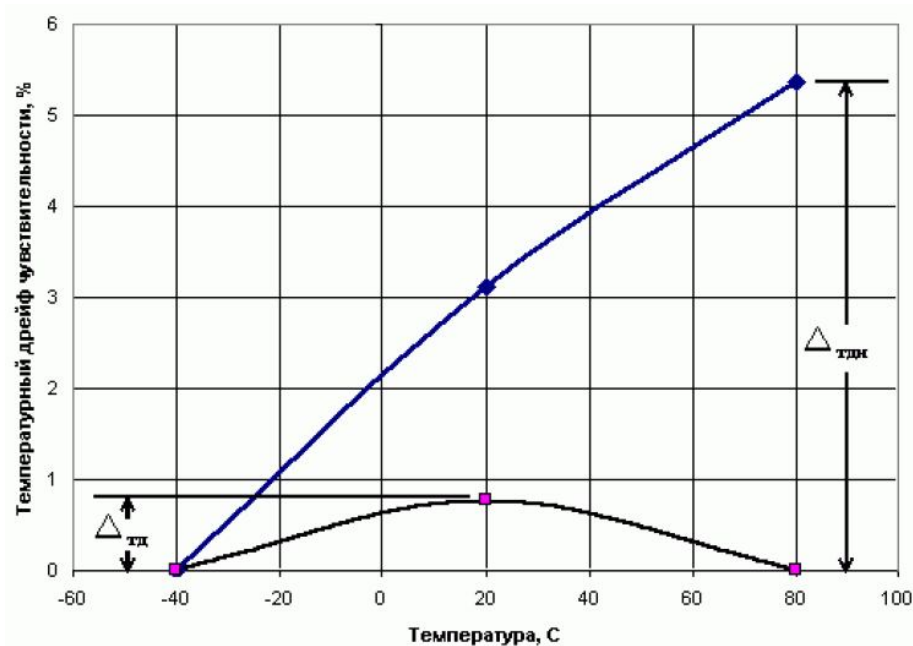
Как видно, температурный дрейф чувствительности датчиков в режиме самокомпенсации ПТЧЭ (когда удельное сопротивление кремния оказывается близким к оптимальному) может быть достаточно мал (см. рисунок 2.33, а). Отметим, что согласно [63] зона дополнительной температурной погрешности датчика с основ-

ной погрешностью 0,1% в диапазоне температур от минус 40 до 80°C не должна превышать $0,1 \cdot 12 = 1,2\%$. Дополнительное использование схмотехнического метода при отклонении удельного сопротивления кремния от оптимального снижает температурную погрешность чувствительности ПТЧЭ в диапазоне температур от минус 40 до 80°C примерно до значения, достигаемого при самокомпенсации (см. рисунок 2.33, б).

Типичные результаты коррекции мультипликативной температурной погрешности на примере серийно выпускаемых датчиков давления МИДА-01П показаны на рисунке 2.34 [16].



а



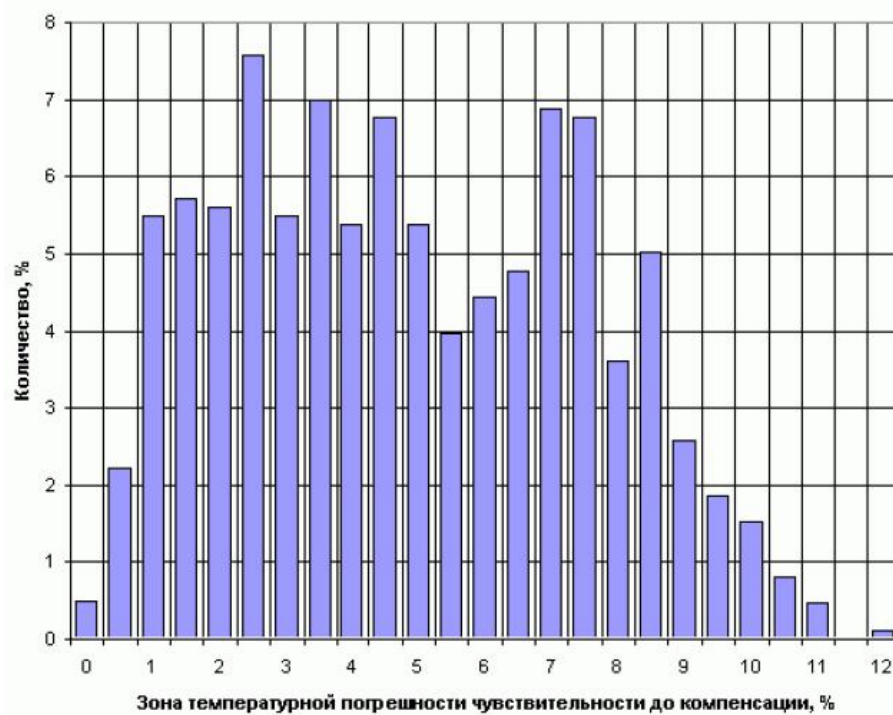
б

$\Delta_{\text{ТДН}}$ – Зона температурной погрешности чувствительности ПТЧЭ до компенсации; $\Delta_{\text{ТД}}$ – зона температурной погрешности чувствительности ПТЧЭ после компенсации

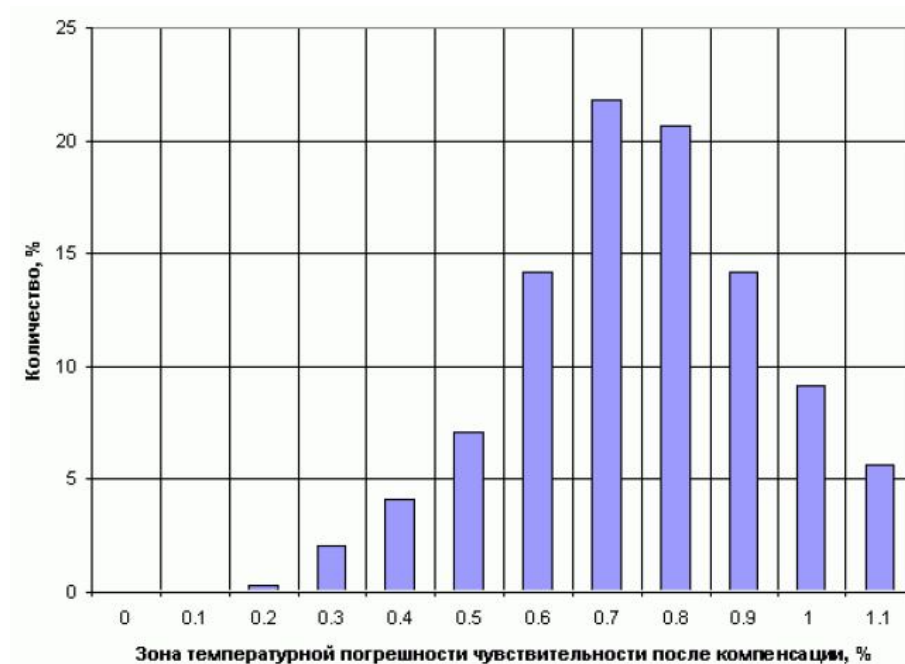
a – температурный дрейф чувствительности ПТЧЭ датчиков давления при питании постоянным током в режиме самокомпенсации в диапазоне температур от минус 40 до 80°C; b – температурный дрейф чувствительности ПТЧЭ датчиков давления до и после термокомпенсации при питании постоянным током

Рисунок 2.33 – Схмотехническая компенсация мультипликативной составляющей ПТЧЭ

Как видно, в среднем мультипликативная температурная погрешность датчиков уменьшается почти в 5 раз по сравнению с исходной погрешностью ПТЧЭ (в этих данных также присутствует неучитываемый вклад температурной погрешности электронной схемы датчика).



a



б

a – исходное распределение; среднее значение $\Delta_{\text{ТДН}} = 3,9\%$; *б* – распределение после компенсации (в датчике); среднее значение $\Delta_{\text{ТД}} = 0,76\%$

Рисунок 2.34 – Зона температурной погрешности чувствительности ПТЧЭ датчиков давления при питании постоянным током в диапазоне температур от минус 40 до 80°C. Диапазон измерения 14 МПа, объем выборки 857 шт.

2.5.2 Температурная компенсация при питании напряжением

Температурную компенсацию ПТЧЭ при питании напряжением рассмотрим на примере [16] и [4] при использовании термoneзависимых и термозависимых резисторов соответственно.

Использование термoneзависимых резисторов [16]

Как уже говорилось выше, питание ПТЧЭ постоянным напряжением позволяет, во-первых, использовать их как самостоятельные элементы в системах контроля и управления, а, во-вторых, упростить электронную схему преобразования сигнала в датчике. К сожалению, в этом случае невозможно полностью исключить температурную погрешность преобразования ПТЧЭ физико-технологическими методами, т.е. изменением характеристик слоя кремния или параметров тензомоста. Вместе с тем, повышение уровня легирования кремния позволяет снизить температурную зависимость как начального выходного сигнала ПТЧЭ, так и его чувствительности; однако, при этом снижается и чувствительность ПТЧЭ к измеряемому давлению, так что и в этом случае существует некоторый оптимальный уровень легирования слоя кремния, при котором отношение «выходной сигнал»/«температурная погрешность» имеет максимальное значение. Для дополнительного снижения температурной погрешности ТП в этом случае приходится использовать схемотехнические методы.

Коррекция аддитивной составляющей температурной погрешности наиболее просто осуществляется включением постоянного резистора параллельно одному из плеч измерительного моста с наибольшим значением температурного коэффициента сопротивления (рисунок 2.35).

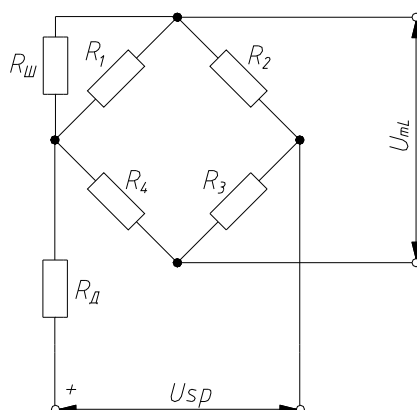


Рисунок 2.35 – Схема включения резистора для термокомпенсации ПТЧЭ при питании постоянным напряжением

Значение резистора $R_{ш}$ выбирается из условия равенства начального выходного сигнала ПТЧЭ при двух температурах T_1 и T_2 , соответствующих границам температурного диапазона компенсации:

$$\frac{R_{ш}(R_1^2(T_1) - R_2^2(T_1)) - R_1^2(T_1)R_2^2(T_1)}{(R_1(T_1)R_2(T_1) + R_{ш}(R_1(T_1) + R_2(T_1)))(R_1(T_1) + R_2(T_1))} =$$

$$= \frac{R_{ш}(R_1^2(T_2) - R_2^2(T_2)) - R_1^2(T_2)R_2^2(T_2)}{(R_1(T_2)R_2(T_2) + R_{ш}(R_1(T_2) + R_2(T_2)))(R_1(T_2) + R_2(T_2))},$$

где R_1 и R_2 – значения тензорезисторов в смежных плечах измерительного моста.

Типичный результат такой схемотехнической компенсации аддитивной температурной погрешности показан на рисунке 2.36 [16].

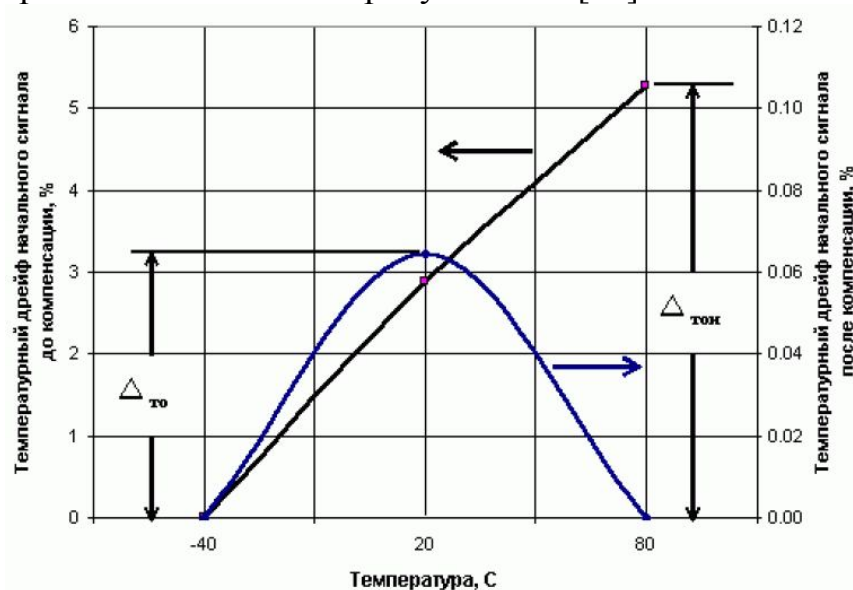


Рисунок 2.36 – Температурный дрейф начального выходного сигнала ПТЧЭ датчиков давления (в процентах от диапазона выходного сигнала) до и после термокомпенсации при питании напряжением

Как видно, даже столь простая схема обеспечивает уменьшение зоны температурной погрешности начального выходного сигнала ПТЧЭ в десятки раз. Статистика показывает, что при серийном производстве среднее значение максимальной зоны аддитивной температурной погрешности для ПТЧЭ, питаемых напряжением, оказывается не хуже, чем при физико-технологической компенсации ПТЧЭ, питаемых током (рисунок 2.37) [16].

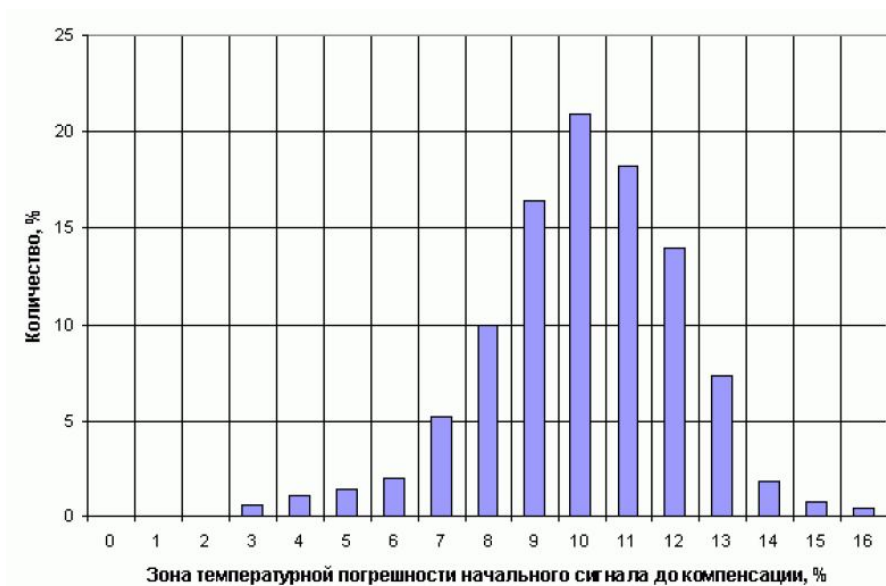
Для коррекции мультипликативной составляющей температурной погрешности в питающую диагональ измерительного моста последовательно включается постоянный резистор R_d (см. рисунок 2.35), значение которого рассчитывается по формуле:

$$R_d = \frac{R_M(T_1)R_M(T_2)(U_d(T_2) - U_d(T_1))}{R_M(T_1)U_d(T_1) - R_M(T_2)U_d(T_2)}.$$

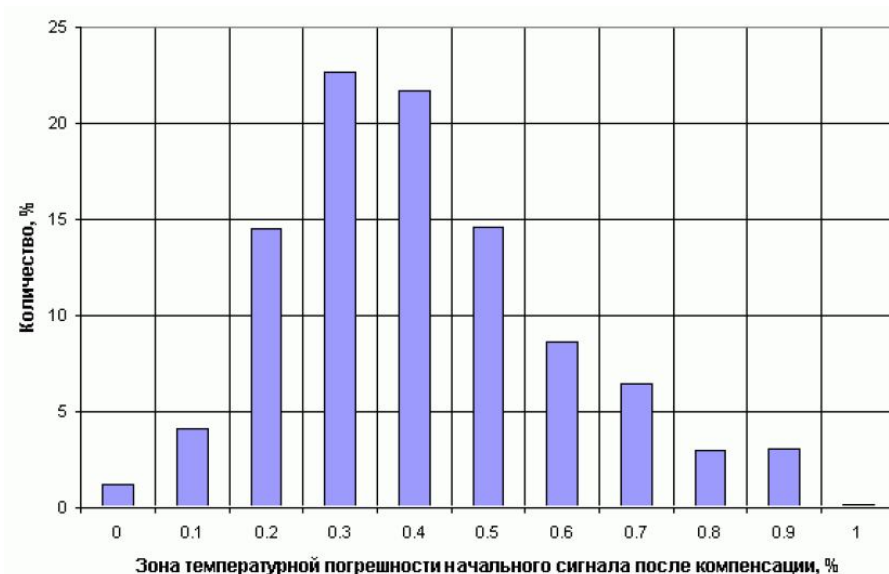
Типичный результат описанной схмотехнической компенсации мультипликативной температурной погрешности ПТЧЭ показан на рисунке 2.38 [16].

Видно, что зона температурной погрешности чувствительности ТП уменьшается в несколько раз. Отметим, что в отличие от случая питания постоянным током (см. рисунок 2.33), при питании постоянным напряжением чувствительность ПТЧЭ убывает с ростом температуры.

Статистическое распределение зоны температурной погрешности чувствительности ПТЧЭ на примере датчиков давления МИДА-ДИ-61П при питании постоянным напряжением в диапазоне температур от минус 40 до 80°C показано на рисунке 2.39 [16].



a



б

a – Исходное распределение; среднее значение $\Delta_{\text{ТОН}} = 9,7 \%$; *б* – распределение после компенсации; среднее значение $\Delta_{\text{ТО}} = 0,4 \%$

Рисунок 2.37 – Зона температурной погрешности начального сигнала ПТЧЭ датчиков давления при питании постоянным напряжением в диапазоне температур от минус 40 до 80°C (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала ПТЧЭ). Диапазон измерения 20 МПа, объем выборки 1411 шт.

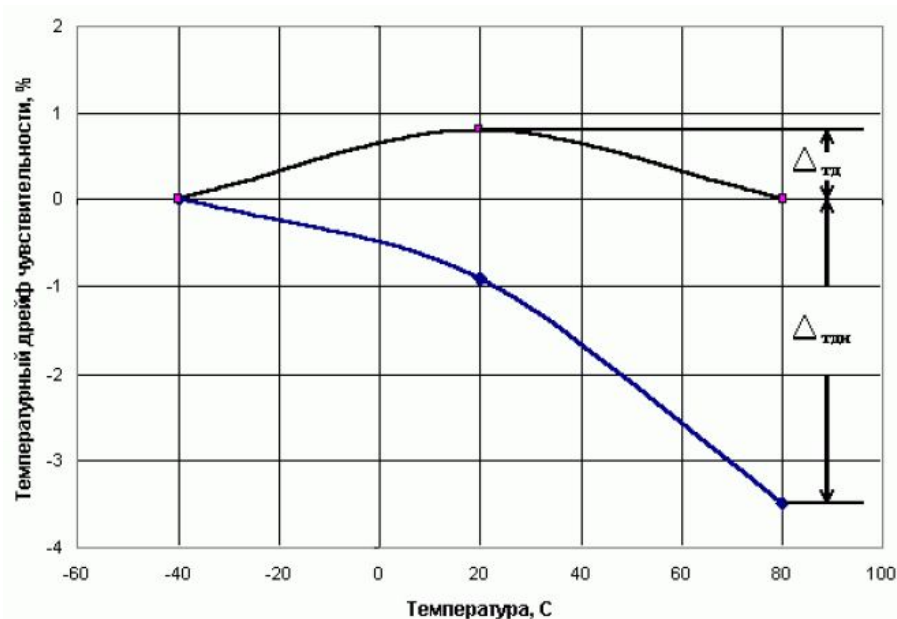
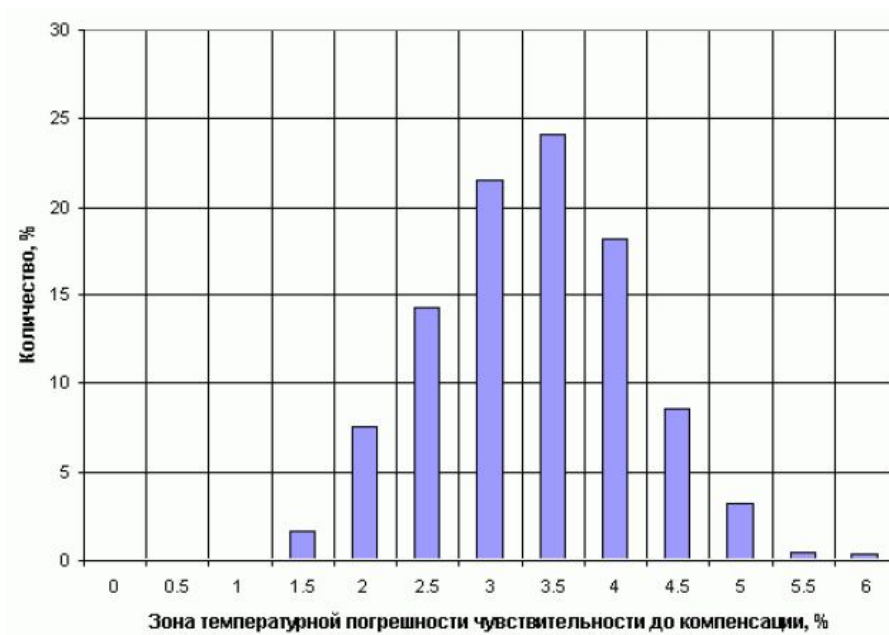
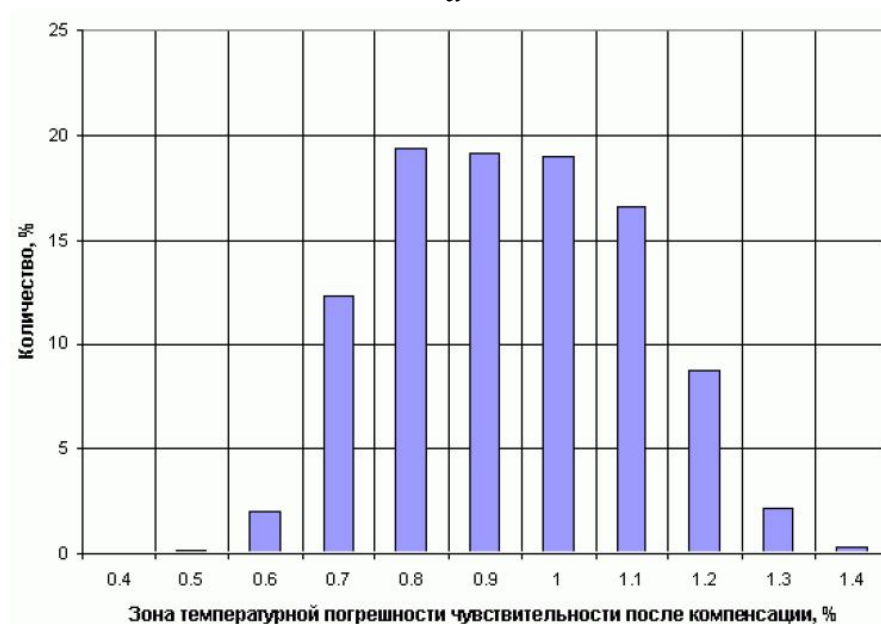


Рисунок 2.38 – Температурный дрейф чувствительности ПТЧЭ датчиков давления до и после температурной компенсации при питании постоянным напряжением в диапазоне температур от минус 40 до 80°C.



a



б

a – Исходное распределение; среднее значение $\Delta_{\text{ТДН}} = 3,1 \%$; *б* – распределение после компенсации; среднее значение $\Delta_{\text{ТД}} = 0,98 \%$

Рисунок 2.39 – Зона температурной погрешности чувствительности ПТЧЭ датчиков давления МИДА–ДИ–61П при питании постоянным напряжением в диапазоне температур от минус 40 до 80°C (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала ПТЧЭ). Диапазон измерения 20 МПа, объем выборки 1411 шт.

Как видно из рисунка, результирующая температурная погрешность чувствительности ПТЧЭ при питании напряжением несколько больше, чем при питании током и почти вдвое больше, чем достигаемая только за счет самокомпенсации чувствительности (см. рисунок 2.33, *a*).

Как уже отмечалось, температурная зависимость выходного сигнала ПТЧЭ после термокомпенсации сильно нелинейна. На рисунке 2.40 показаны экспериментальные температурные зависимости начального сигнала и чувствительности ПТЧЭ МИДА-ДИ-61П, снятые подробно в диапазоне температур от минус 40 до 80°C [16].

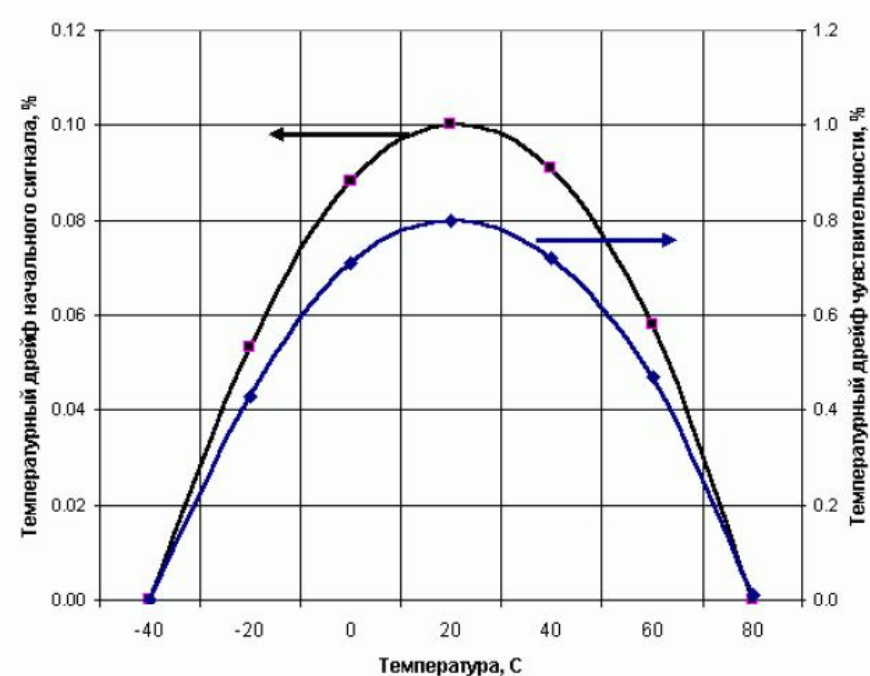


Рисунок 2.40 – Типичные температурные зависимости нуля и чувствительности ПТЧЭ датчиков давления МИДА-ДИ-61П при питании напряжением после компенсации. Линии – расчетные параболы

Как следует из рисунка, обе зависимости весьма близки к параболическим, что подтверждает обоснованность принятой методики термокомпенсации и проверки ее эффективности по трем температурным точкам – на краю и в центре температурного диапазона компенсации.

В заключение на рисунке 2.41 приведены статические данные по максимальной зоне дополнительной температурной погрешности датчиков давления МИДА-ДИ-01П и МИДА-ДИ-13П [63], в которых ПТЧЭ питаются соответственно от источника тока и источника напряжения [16].

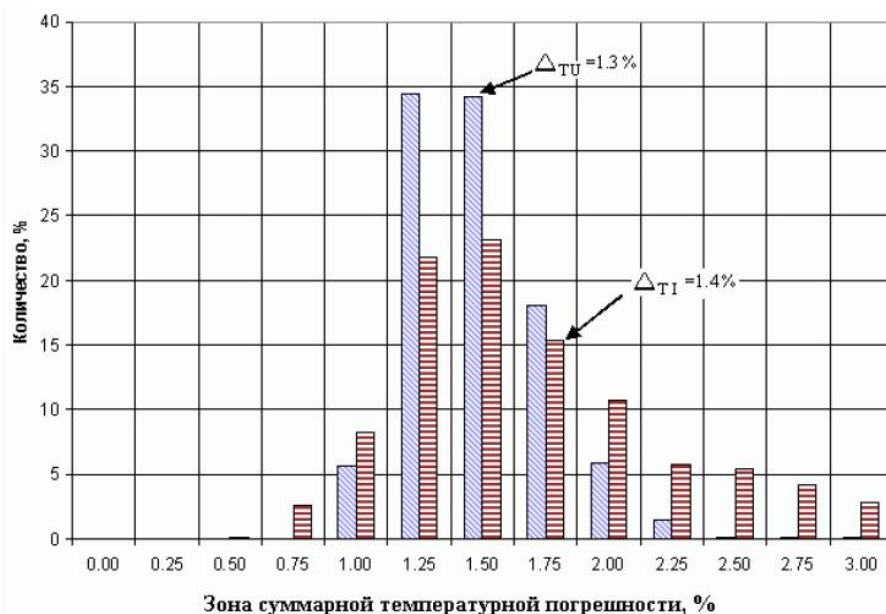


Рисунок 2.41 – Зона суммарной температурной погрешности датчиков МИ-ДА-ДИ-01П и МИДА-ДИ-13П в диапазоне температур от минус 40 до 80°C

Из этих данных следует, во-первых, что средние значения зоны дополнительной температурной погрешности у датчиков обоих типов близки (1,3...1,4 %), и даже питание ПТЧЭ постоянным напряжением является предпочтительным, особенно если учесть, что при этом в электронной схеме датчика исключается каскад источника тока. Во-вторых, если учесть, что согласно [63], для датчиков класса 0,1 зона дополнительной температурной погрешности не должна превышать 1,2 % (в диапазоне температур от минус 40 до 80°C) и соответственно для класса 0,2-2,4 %, для класса 0,25-3,0 %, то по дополнительной температурной погрешности практически все датчики МИДА-ДИ-13П удовлетворяют классу 0,25 % и около 40 % – классу 0,1 %.

Использование термозависимых резисторов [4]

При питании от источника постоянного напряжения для компенсации могут быть применены две основные схемы. По схеме, представленной на рисунке 2.42, а, термозависимое сопротивление, пространственно размещаемое как можно ближе к полупроводниковым тензорезисторам, включается последовательно в цепь питания моста и должно обладать отрицательным ТКС, а для схемы, представленной на рисунке 2.42, б – положительным ТКС.

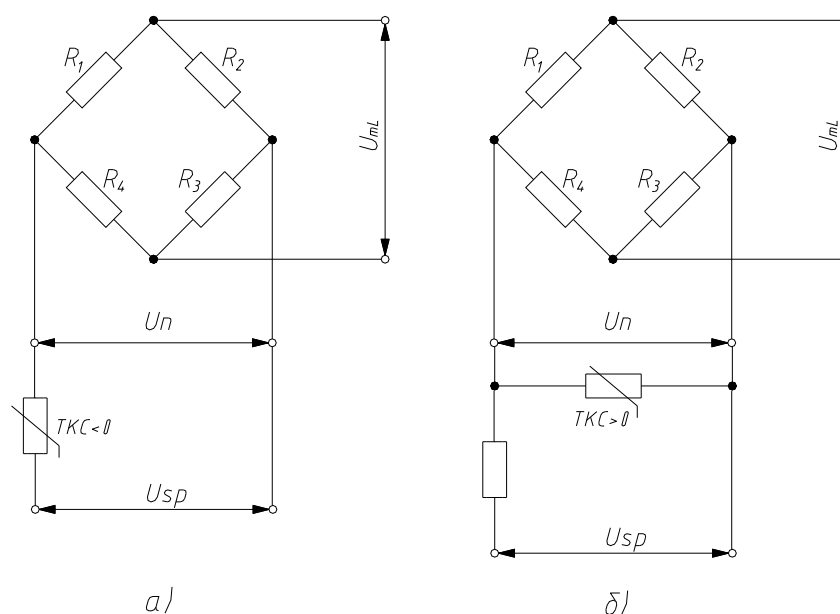


Рисунок 2.42 – Основные схемы температурной компенсации коэффициента тензочувствительности моста

Значение ТКС для полупроводниковых терморезисторов может лежать в диапазоне $\pm(0,2 \dots 0,8)\%/^{\circ}\text{C}$. Вследствие сравнительно низких значений ТКС такого компенсирующего резистора последний по отношению к мосту должен быть низкоомным, в то время как последовательно включенное сопротивление должно быть равно сопротивлению моста или больше его.

Расчет компенсирующего устройства можно с приемлемыми затратами провести лишь весьма приблизительно, причем как для моста, так и для терморезистора учитываются только линейные температурные зависимости. Для простоты мы в дальнейшем будем рассматривать мост в режиме холостого хода (рисунок 2.43).

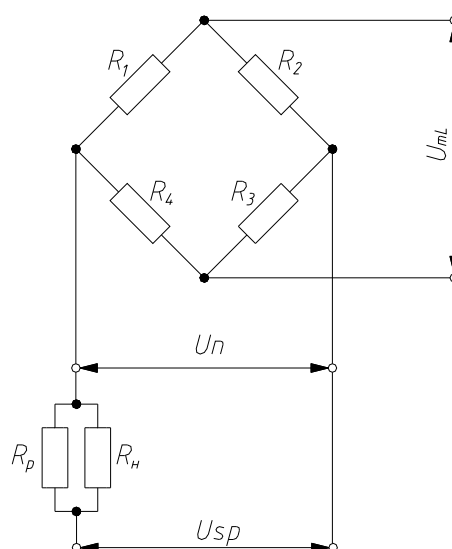


Рисунок 2.43

При параллельном включении терморезистора с отрицательным ТКС R_H и терморезистора R_p общее сопротивление R_V выразится следующим образом:

$$R_{V\theta} = \frac{R_p R_H (1 + \gamma_H \Delta T)}{R_p + R_H (1 + \gamma_H \Delta T)} \approx \frac{R_p R_H}{R_p + R_H} \left(1 - \gamma_H \frac{R_p}{R_p + R_H} \Delta T \right),$$

где T – температура;
 γ – ТКС:

$$\gamma = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta T},$$

где R_0 – сопротивление тензорезистора при нормальной температуре.
 При этом предполагается, что

$$R_V = \frac{R_p R_H}{R_p + R_H} \text{ и } \gamma_V = \gamma_H \frac{R_p}{R_p + R_H}.$$

Согласно (2.17), выходное напряжение моста можно представить в виде:

$$U_{mL} = U_{sp} \frac{R_{BT}}{R_{BT} + R_{VT}} B'_\epsilon (1 + \chi_1 \Delta T) \epsilon,$$

где χ_1 – температурный коэффициент коэффициента тензочувствительности K :

$$\chi_1 = \frac{\delta K / K}{\delta T},$$

где δ – изменение, зависящее от температуры;
 $R_B = (R_1 + R_2) \parallel (R_3 + R_4)$ – входное сопротивление (сопротивление на клеммах моста без дополнительных сопротивлений).

С учетом температурной зависимости сопротивлений имеем:

$$U_{mL} \approx U_{sp} B'_\epsilon \epsilon \frac{1 + \chi_1 \Delta T}{\left(1 + \frac{R_V}{R_B} \right) \left[1 + (\gamma_V - \gamma_B) \frac{R_V}{R_V + R_B} \Delta T \right]}.$$

Устройство в первом приближении будет термoneзависимым, если

$$\chi_1 = (\gamma_V - \gamma_B) \frac{R_V}{R_V + R_B}.$$

Исходя из этого уравнения, можно вычислить значение шунтирующего сопротивления при выбранном значении сопротивления терморезистора с отрицательным ТКС:

$$R_p = -a_1 R_H \left[1 + \sqrt{1 - \frac{R_B a_2}{R_H a_1^2}} \right],$$

где
$$a_1 = \frac{\chi_1 \frac{R_B}{R_H} + \frac{\gamma_B + \chi_1}{2}}{(\gamma_B + \chi_1 - \gamma_H) + \chi_1 \frac{R_B}{R_H}}, \quad a_2 = \frac{\chi_1}{(\gamma_B + \chi_1 - \gamma_H) + \chi_1 \frac{R_B}{R_H}}.$$

Литература

- 1 Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник в трех томах. – т. I (кн. 2) / Под общ. ред. Ю.Н. Коптева; под ред. Е.Е. Багдатьяна, А.В. Гориша, Я.В. Малкова. – М.: ИПРЖР, 1998. – 512 с.: ил.
- 2 Сысоева С. Взгляд на современный рынок автомобильных датчиков. Основные тенденции и важнейшие рыночные фигуры // Компоненты и технологии. – 2006. – №7. – С. 18–24.
- 3 www.pressure.ru
- 4 В. Эрлер, Л. Вальтер. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами. – М.: Мир, 1974. – 286 с.
- 5 Smith Ch. S., “Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon”, Phys. Rev., №1, 42 (1954).
- 6 Mason W.P., Piezoelektric Crystals and their Application to Ultrasonics, 2nd ed., New York, van Nostrand, 1956.
- 7 Rohrbach Chr., Czaika N., “Über Funktion, Eigenschaften und Anwendungen von Halbleitergebern”, Materialprüfung, 4, H. 6, 189 (1962).
- 8 Nittner A., Abschlußbericht №8/64 zur FuE-Arbeit “Halbleiterdehnmeßstreifen”, VEB Meßelektronik Dresden, BT 3, №4-53/3.
- 9 Виглеб. Датчики. Устройство и применение. – М.: Мир, 1989.
- 10 Ваганов В.И. Интегральные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с., ил.
- 11 Advanced micro & nanosystems. Vol. 2 CMOS-MEMS. Edited by H. Baltes, O. Brand, G.K. Fedder, C. Hierold, J. Korvink, O. Tabata / WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. – 2005.
- 12 Сгибов А.М., Трухачев Б.С., Носовский А.В. Температурная компенсация моста, содержащего четыре тензорезистора // Приборы и системы управления. – 1975. – №11.
- 13 Евдокимов В.И. О коррекции аддитивной погрешности мостов с полупроводниковыми тензорезисторами // Тр. института. Сб. 88. М.: НИИТеплоприбор. – 1979.
- 14 Рыбаков М.М., Ялышев А.У. Новый подход к коррекции аддитивной температурной погрешности тензорезисторных мостовых схем с помощью относительных температурных характеристик тензорезисторов // Датчики и системы. – 2004. – №7. – С. 2–6.
- 15 Рыбаков М.М., Юровский А.Я. Об одном способе коррекции аддитивной температурной погрешности в мостовых тензорезисторных схемах // Датчики и системы. – 1999. – №7–8. – С. 33–37.
- 16 Мартынов Д.Б., Стучебников В.М. Температурная коррекция тензопреобразователей давления на основе КНС // Датчики и системы. – 2002. – №10. – С. 6–12.
- 17 Smith, C.S., “Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon”, Phys. Rev., 94, 42-49, 1954.

- 18 Y. Kanda, "A Graphical Representation of the Piezoresistance Coefficients in Silicon", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-29, pp. 64-70, 1982.
- 19 Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.: ил.
- 20 А.Ю. Сметанов, Ю.Р. Носов. НПП «Сапфир» – на взлете. История продолжается // Электроника. – 2006. – №5. – С. 4-10.
- 21 Peeters, E., "Process Development for 3D Silicon Microstructures, with Application to Mechanical Sensor Design," Ph.D. thesis, Catholic University of Louvain, Belgium, 1994.
- 22 Tufte O.N., Chapman P.W., Long D. Silicon diffused element piezoresistive diaphragms. – J. of Appl. Phys., 1962, v. 33, N 11, p. 3322-3327.
- 23 К 50-летию открытия пьезорезистивного эффекта. История и состояние развития пьезорезистивных датчиков // Экспресс-информация. – 2005. – № 23.
- 24 Гридчин В.А., Драгунов В.П. Физика микросистем: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 416 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).
- 25 Tufte O.N., Stelzer E.L. Piezoresistive properties of silicon diffused layers. – J. of Appl. Phys., 1963, v. 34, N 9, p. 313-318.
- 26 Пивоненков Б.И., Стучебников В.М. Проектирование полупроводниковых интегральных тензочувствительных структур // Приборы и системы управления. – 1976. – №1. – С. 20-21.
- 27 Гридчин В.А. Критериальный подход к выбору размещения тензорезисторов в интегральных тензопреобразователях // Известия северо-кавказского научного центра высшей школы. Технические науки. – 1978. – №2. – С. 12-15.
- 28 Ваганов В.И., Носкин А.Б. // Анализ чувствительности интегральных тензорезисторных преобразователей мембранного типа с учетом сдвигового пьезорезистивного эффекта // В кн.: Электронная измерительная техника / Под ред. А.Г. Филиппова, М.: Атомиздат. – 1980. – вып. II. – С. 131-141.
- 29 ASTM Standard F 723-88, Standard Practice for conversion between resistivity and dopand density for Boron – and Phosphorus doped silicon. – 1966. Annual Book of ASTM Standards, Am. Soc. Tech. Mat., West Conshohockeen, PA, 1966.
- 30 M. Elwenspoek, H. Jansen. Silicon Micromachining. p.cm. – (Cambridge studies in semiconductor physics and microelectronic engineering; 7). – Cambridge University Press. – 1998 (ISBN 0 521 59054 X).
- 31 M. Alavi, S. Büttgenbach, A. Schumacher, and H.-J. Wagner, Sensors and Act. A32, 299 (1992).
- 32 Carlson K.O. Electrical properties of near-degenerate boron-doped silicon // Phys. Rev. – 1955. – Vol. 100, №4. – P. 1075-1078.
- 33 Irvin I.C. Resistivity of bulk silicon and of diffused layers in silicon // The Bell System Nechn. J. – 1962. – Vol. 61, № 2. – P. 361-409.
- 34 Спиридонов Н.С., Ветроградов В.И. Дрейфовые транзисторы. – М.: Сов. радио, 1964. – 304 с.

- 35 Gupta M.L., Shettacharyya A.B. Analitic evaluation of diffused impurity layers in silicon // *Electronic Lett.* – 1970. – Vol. 6, №9. – P. 291-293.
- 36 ASTM Standard F 84-93, «Standard Method for Measuring Resistivity of Silicon Slices With a collinear Four-Point Probe» – *Annual Book of ASTM Standards*, Am. Soc. Tech. Mat., PA, 1966.
- 37 Ермолаев Ю.П., Пономарев М.Ф., Крюков Ю.Г. Конструкция и технология микросхем. М.: Радио и связь, 1980 – 256 с.
- 38 Матсон Э.А., Крыжановский Д.В. Справочное пособие по конструированию микросхем. – Минск. Высшая школа, 1982 – 224 с.
- 39 Берри Р., Холл П., Гаррис М. Тонкопленочная технология. М.: Энергия, 1972. – 336 с.
- 40 ОСТ 107.460084.200-88. Микросборки. Общие требования и нормы конструирования.
- 41 Спирин В.Г. Выбор конструкций тонкопленочных резисторов для микросборок высокой интеграции // *Электронная промышленность.* – 2005. – №1. – С. 55-59.
- 42 Hall P.M. “Resistance Calculations for Thin Film Patterns”, *Thin Solid Films*, 1, 277-295 (1968).
- 43 Hagedorn F.B. and Hall P.M. «Right Angle Bends in Thin Strip Conductors», *J. of Appl. Phys.*, 34, 128-133 (January 1963).
- 44 Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учебное пособие для вузов / Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И., и др.; Под ред. Л.А. Коледова. – М.: Высш. шк., 1984. 231 с., ил.
- 45 Спирин В.Г. Влияние ошибок совмещения на погрешность сопротивления тонкопленочного резистора // *Электронная промышленность.* – 2005. – №1. – С. 60-62.
- 46 ОСТ 92-1729-88 «Элементы чувствительные полупроводниковые преобразователей механических величин». Общие требования к типовым технологическим процессам изготовления.
- 47 ГОСТ 3.1109-82. «Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий».
- 48 Couteau T. Dilute RCA cleaning chemistries // *Semiconductor International*. 1996. Vol. 21. N 11. Oct. P. 95-100.
- 49 Meuris M., Merteus P. W., Opdebeeck A. The IMEC clean: a new concept for particle and metal removal on Si surfaces // *Solid State Technology*. 1995. Vol. 38. N 7. P. 109.
- 50 Ohmi T. Total room temperature wet cleaning of silicon surfaces // *Semiconductor International*. 1996. Vol. 19. N 8. Jul.
- 51 Тимошенко С.П., Калугин В.В., Прокопьев Е.П. Исследование технологии очистки поверхности пластин кремния в процессе изготовления структур КНИ и микроэлектронных изделий // *Микросистемная техника.* – 2003. – №1.
- 52 Hall R.M., Rosato J.J. Improving rinse efficiency with automated cleaning tools // *Semiconductor International*. 1996. V. 19. № 11.

- 53 www.frast.ru.
- 54 Стучебников В.М. О нормировании температурной погрешности тензорезистивных полупроводниковых датчиков // Датчики и системы. – 2004. – №9. – С. 15-19.
- 55 Бушев В.В., Николайчук О.Л., Стучебников В.М. Серия микроэлектронных датчиков давления МИДА // Датчики и системы. – 2000. – № 1. – С. 21-27.
- 56 Стучебников В.М. Физико-технологические методы оптимизации метрологических характеристик полупроводниковых тензопреобразователей // Датчики систем измерения, контроля и управления // Межвуз. Сборник научных трудов. – Вып. 5. – Пенза. – ППИ. – 1985. – С. 15-25.
- 57 Лурье Г.И., Стучебников В.М. и др. Способ настройки интегральных тензомостов с питанием от источника стабилизированного тока. // АС СССР № 1411571, 1988.
- 58 Лучко В.Е., Сычугов Е.М. Термостабильные тензометрические преобразователи для датчиков давления // Датчики и системы. – 2000. – №11-12. – С. 25-27.
- 59 Стучебников В.М., Суханов В.И., Хасиков В.В. Тензорезисторные чувствительные элементы на основе структур «кремний на сапфире» в преобразователях давления для высоких температур // Приборы и системы управления. – 1981. – №3. – С. 23.
- 60 Полупроводниковые тензодатчики / Под ред. М. Дина. М. – Л.: Энергия, 1985. 213 с.
- 61 Гридчин В.А. Оптимизация параметров интегральных тензопреобразователей. – В кн.: Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на базе микроэлектроники. М., 1980, С. 31.
- 62 Capteurs de pressions piezoresistants: Препринт фирмы Schlumberger (Франция), 1976. 24р.
- 63 ГОСТ 22520-85. Датчики давления, разряжения и разности давлений с электрическими аналоговыми сигналами ГСП. Общие технические условия.
- 64 А.с. 1486767. Способ настройки интегрального тензомоста с питанием от источника тока // Изобретения. 1989.
- 65 Ю.А. Зеленцов, В.Ю. Зеленцов. Об эффективности пассивных схем термокомпенсации дрейфа начального разбаланса тензомостов // Датчики и системы. – 2007. – №2. – С. 10-13.
- 66 Булкин А.Д., Якивчик Н.И. Технология и оборудование производства силовых полупроводниковых приборов: Учебник для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 256 с., ил.
- 67 В.Г. Литовченко, В.П. Шаповалов. Исследование процессов геттерирования в кремнии // Микроэлектроника – Т. 17. – Вып. 4. – 1988 – С. 305.
- 68 Баринов И.Н. Полупроводниковые чувствительные элементы датчиков давлений на основе структуры «кремний-на-диэлектрике»: Дис....канд. техн. наук: 05.11.14. – Защищена 22.12.05; Утв. 14.04.06; 15к/38. – Пенза. – 2005. – 212 с.

- 69 Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия. Под ред. Р. Бургера и Р. Донована. // Пер. с англ. под ред. В.Н. Мордковича, Ф.П. Пресса. М.: Мир, 1969. – 451 с., ил.
- 70 Распопов В.Я. Принципы построения датчиков давления и топология тензорезисторов // Датчики и системы. – 2007. – №2. – С. 22-26.
- 71 Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Наука, 1966. – 635 с.
- 72 Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1972. – 451 с.
- 73 Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.: ил.
- 74 Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки. М. – Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1947. – 355 с.
- 75 Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. М.: Наука, 1967. – 266 с.
- 76 Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник. Москва: Техносфера, 2006. – 592 с.